

# Les molécules et matériaux per- et polyfluoroalkylés (PFAS)

Importance industrielle et gestion  
des crises environnementales et sanitaires

*Rapport de l'Académie*



# **LES MOLÉCULES ET MATÉRIAUX PER- ET POLYFLUOROALKYLÉS (PFAS)**

## **IMPORTANCE INDUSTRIELLE ET GESTION DES CRISES ENVIRONNEMENTALES ET SANITAIRES**

### Rapport

Ce rapport a été rédigé sous la direction de Diane d'ARRAS, Paul-Joël DERIAN, Yves LÉVI et Patrick MAESTRO.

Il est le produit d'un groupe de travail dont la composition complète est précisée en annexe. Il répond à un processus rigoureux au sein de l'Académie des technologies garantissant son indépendance et son objectivité ; il a été approuvé et voté lors de l'Assemblée générale des académiciens.

Octobre 2025

# SOMMAIRE

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Résumé                                                                          | 5  |
| Executive summary                                                               | 8  |
| Contexte                                                                        | 11 |
| Chapitre 1                                                                      |    |
| Les PFAS : de quoi parlons-nous ?                                               | 15 |
| 1.1. Définir et connaître les classes de PFAS                                   | 16 |
| 1.2. Ne pas confondre petites molécules et polymères                            | 17 |
| 1.3. Diversités des caractéristiques physico-chimiques des PFAS et conséquences | 19 |
| Chapitre 2                                                                      |    |
| La très large diversité des usages et l'importance technologique des PFAS       | 31 |
| Chapitre 3                                                                      |    |
| Principaux problèmes à l'origine de la crise                                    | 35 |
| 3.1. Une contamination ubiquitaire sur la planète (air, eaux, sols)             | 35 |
| 3.2. Des risques toxiques avérés (écotoxiques, santé humaine)                   | 47 |
| Chapitre 4                                                                      |    |
| La réponse des États : Vers une interdiction totale ou sélective ?              | 56 |
| 4.1. La situation européenne                                                    | 57 |
| 4.2. France                                                                     | 60 |
| 4.3. Le grand International                                                     | 61 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Chapitre 5                                                                                                                |    |
| Considérations : enjeux technologiques et industriels                                                                     | 68 |
| 5.1. Hiérarchiser des cibles prioritaires à réduire/éliminer/substituer                                                   | 69 |
| 5.2. Définir des conditions d'usages sans risques                                                                         | 69 |
| 5.3. Produire sans polluer                                                                                                | 70 |
| 5.4. Substituer                                                                                                           | 71 |
| 5.5. Mettre en œuvre des filières de collecte/élimination des déchets<br>et des produits en fin de vie contenant des PFAS | 75 |
| 5.6. Dépolluer les milieux contaminés                                                                                     | 79 |
| Chapitre 6                                                                                                                |    |
| Recommandations                                                                                                           | 83 |
| 6.1. Communication et pédagogie indispensables                                                                            | 83 |
| 6.2. Hiérarchisation des risques                                                                                          | 83 |
| 6.3. Fabrications de polymères jugés indispensables par manque d'alternatives<br>validées                                 | 84 |
| 6.4. Contrôle des importations                                                                                            | 84 |
| 6.5. Concernant les usages                                                                                                | 85 |
| 6.6. Lutter contre les risques de dissémination                                                                           | 85 |
| 6.7. Importance des collectes et du tri                                                                                   | 86 |
| 6.8. Organiser une destruction sans risques                                                                               | 86 |
| 6.9. S'appuyer sur les filières                                                                                           | 86 |
| 6.10. Remédier aux pollutions existantes                                                                                  | 87 |
| Annexes                                                                                                                   | 88 |
| A. Membres du groupe de travail                                                                                           | 89 |
| B. Personnes auditionnées                                                                                                 | 90 |
| C. Glossaire et acronymes                                                                                                 | 92 |

## Résumé

### **PFAS : ENJEUX, RISQUES ET RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES**

Les molécules, produits et matériaux per- et polyfluoroalkylés (PFAS), souvent qualifiés de « polluants éternels », constituent une famille chimique vaste et hétérogène, allant des petites molécules (jusqu'à 500 gr par mole) aux polymères de masse molaire beaucoup plus élevée. Les PFAS sont utilisés depuis les années 1940 dans une multitude d'applications industrielles et grand public. Leur succès repose sur des propriétés physico-chimiques uniques : résistance thermique et chimique, imperméabilité, faible friction, stabilité mécanique. Mais cette utilisation extensive des PFAS est à l'origine d'une crise environnementale et sanitaire mondiale, en raison d'une très large diffusion dans l'environnement de petites molécules qui présentent une **extrême persistance** et une **toxicité avérée**.

### **DES USAGES STRATÉGIQUES, MAIS UNE POLLUTION PLANÉTAIRE**

Les PFAS sont présents dans des secteurs clés : énergie, aéronautique, automobile, électronique, médical, agrochimie, emballages, textiles, etc. Certains polymères fluorés sont jugés indispensables faute d'alternatives validées. Toutefois, leur fabrication, usage et fin de vie peuvent générer des rejets de petites molécules toxiques et mobiles dans l'environnement.

Des analyses exhaustives, capitalisant sur les progrès en chimie analytique, ont révélé leur présence **généralisée** dans les eaux, les sols, l'air, les aliments et les organismes vivants. Les petites molécules telles que les PFOA, PFOS, PFHxS ou TFA ont ainsi été détectées à des niveaux de présence préoccupants car elles migrent dans les chaînes alimentaires, franchissent les barrières biologiques (placenta, lait maternel) et s'accumulent dans les tissus humains.

## PETITES MOLÉCULES : DES RISQUES SANITAIRES ET ÉCOTOXIQUES AVÉRÉS

Les effets toxiques des petites molécules PFAS incluent: cancers, perturbations endocriniennes, atteintes hépatiques, immunitaires et reproductives. Les études épidémiologiques et toxicologiques montrent une imprégnation généralisée des populations, avec des demi-vies biologiques très longues (jusqu'à 27 ans pour le PFOS chez l'humain). Les impacts sur la faune et les écosystèmes sont également documentés.

## UNE RÉPONSE RÉGLEMENTAIRE EN CONSTRUCTION

L'Union européenne, les États-Unis, le Canada, l'Australie, la Chine et d'autres pays ont engagé des **restrictions progressives** sur les PFAS, avec des calendriers variables. En France, la loi du 27 février 2025 interdit, dès 2026, certains usages (cosmétiques, textiles, farts), avec des dérogations pour les usages essentiels. Ainsi, le plan interministériel PFAS 2023–2027 vise, entre autres, à réduire les émissions, encadrer les usages et renforcer la transparence.

## ENJEUX INDUSTRIELS ET TECHNOLOGIQUES : VERS UNE TRANSITION MAÎTRISÉE

Face à l'ampleur du problème, une stratégie globale est nécessaire :

- **hiérarchiser les PFAS** selon leur toxicité, persistance et importance industrielle.
- **encadrer les usages essentiels** par des conditions strictes (traçabilité, marquage, collecte, destruction).
- **produire sans polluer**, en garantissant des procédés industriels propres et contrôlés.
- **substituer les PFAS** dès que possible par des alternatives sûres, validées scientifiquement.
- **mettre en place des filières de collecte et de destruction** à haute température (>1300 °C), sous atmosphère contrôlée et avec traitement des fumées.

- **traiter les eaux contaminées**, notamment celles destinées à la consommation humaine, par charbon actif, membranes ou résines, avec régénération contrôlée.
- **dépolluer les sols** de manière ciblée, selon les risques et les coûts, en privilégiant les technologies éprouvées.

#### RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES

1. **Communication claire** sur la diversité des PFAS et leurs risques différenciés.
2. **Hiérarchisation des risques** pour orienter les interdictions, substitutions et autorisations.
3. **Contrôle des importations** pour éviter les PFAS cachés dans des produits importés.
4. **Responsabilité élargie des producteurs** pour financer notamment les traitements des eaux usées.
5. **Structuration de filières REP** pour la collecte, le tri et la destruction des produits PFAS.
6. **Recherche et innovation** pour développer des alternatives, des méthodes de détection et des procédés de dépollution.

## Executive summary

### **PFAS: ISSUES, RISKS AND STRATEGIC RECOMMENDATIONS**

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), often referred to as "forever chemicals", are a large and diverse family of chemicals, ranging from small molecules (up to 500 grams per mole) to polymers with much higher molecular weights. PFAS have been used since the 1940s in a multitude of industrial and consumer applications. Their success is based on unique physicochemical properties: thermal and chemical resistance, impermeability, low friction and mechanical stability. However, this extensive use of PFAS has led to a global environmental and health crisis due to the widespread distribution in the environment of small molecules that are **extremely persistent** and **proven to be toxic**.

### **STRATEGIC USES BUT GLOBAL POLLUTION**

PFAS are present in key sectors: energy, aeronautics, automotive, electronics, medical, agrochemicals, packaging, textiles, etc. Some fluorinated polymers are considered indispensable due to the lack of validated alternatives. However, their manufacture, use and end of life can generate releases of small toxic and mobile molecules into the environment.

Exhaustive analyses, capitalising on advances in analytical chemistry, have revealed their **widespread** presence in water, soil, air, food and living organisms. Small polyfluoroalkanoate molecules such as PFOA, PFOS, PFHxS and TFA have been detected at levels of concern because these molecules migrate through food chains, cross biological barriers (placenta, breast milk) and accumulate in human tissue.

## **SMALL MOLECULES : PROVEN HEALTH AND ECOTOXICOLOGICAL RISKS**

The toxic effects of small PFAS molecules include cancer, endocrine disruption, and liver, immune and reproductive damage. Epidemiological and toxicological studies show widespread contamination of populations, with very long biological half-lives (up to 27 years for PFOS in humans). The impacts on wildlife and ecosystems are also documented.

## **A REGULATORY RESPONSE IN THE MAKING**

The European Union, the United States, Canada, Australia, China and other countries have introduced **progressive restrictions** on PFAS, with varying timetables. In France, the law of 27 February 2025 prohibits certain uses (cosmetics, textiles, waxes) from 2026, with exemptions for essential uses. The 2023–2027 interministerial PFAS plan aims, among other things, to reduce emissions, regulate uses and increase transparency.

## **INDUSTRIAL AND TECHNOLOGICAL CHALLENGES: TOWARDS A CONTROLLED TRANSITION**

Given the scale of the problem, a comprehensive strategy is needed:

- **Prioritise PFAS** according to their toxicity, persistence and industrial importance.
- **Regulate essential uses** through strict conditions (traceability, labelling, collection, destruction).
- **Produce without polluting**, ensuring clean and controlled industrial processes.
- **Replace PFAS** as soon as possible with safe, scientifically validated alternatives.
- **Establish collection and high-temperature destruction (<1300°C) systems** in a controlled atmosphere with fume treatment.

- **Treat contaminated water**, particularly water intended for human consumption, using activated carbon, membranes or resins, with controlled regeneration.
- **Decontaminate soil** in a targeted manner, according to risk and cost, favouring proven technologies.

#### STRATEGIC RECOMMENDATIONS

1. **Clear communication** on the diversity of PFAS and their differentiated risks.
2. **Prioritise risks** to guide bans, substitutions and authorisations.
3. **Control imports** to avoid PFAS hidden in foreign products.
4. **Extended producer responsibility** to finance wastewater treatment.
5. **Structure EPR<sup>1</sup> schemes** for the collection, sorting and destruction of PFAS products.
6. **Research and innovation** to develop alternatives, detection methods and decontamination processes.

---

1 Extended producer responsibility (EPR – REP in French) schemes are based on the principle of extended producer responsibility, recognised in the European Waste Framework Directive. According to this principle, producers, i.e. those who place certain products on the market, can be made responsible for financing or organising the prevention and management of waste from these products at the end of their life.

## Contexte

Une grande crise internationale s'est développée depuis 20 ans concernant des produits chimiques réunis sous le vocable de « PFAS », souvent qualifiés de « polluants éternels » par des médias. Il s'agit de molécules et matériaux per- et polyfluoroalkylés dont les usages, intérêts et importances sont nombreux dans beaucoup de domaines et qui, pour certains, représentent des pollutions majeures de l'environnement et des risques sanitaires au long de leur cycle de vie. Ces éléments nécessitent de bien connaître et comprendre les enjeux majeurs et les solutions associés à cette crise.

De nombreux rapports et médias fournissent des informations générales permettant d'entrevoir et de comprendre tous les grands enjeux de la question des PFAS<sup>2, 3</sup>. Toutefois, ces enjeux étant complexes et induisant de très grandes conséquences, concernant notamment la protection de l'environnement et celle de la santé publique ainsi que la sécurité et le bon déroulé des productions industrielles, il est fondamental d'éclairer le sujet dans le cadre de ces contextes, et d'éviter des simplifications, erreurs ou imprécisions. Par exemple, de nombreuses communications présentent trop souvent tous les PFAS, et les produits à base de PFAS comme un ensemble unique et identique (« Les PFAS »), sans aucune distinction de leurs propriétés physico-chimiques et de leurs niveaux de toxicité, alors que de grandes différences existent. En complément, l'appréciation de l'étendue des

---

2 Isaac-Sibille C, Per- et polyfluoroalkylés (PFAS) pollution et dépendance : Comment faire marche arrière ? Rapport remis au premier ministre, 2024.

<https://cyrille.isaac-sibille.fr/mission-gouvernementale-pfas>

3 Chaudret B, Donard OFX, Eisenstein O, Pietrykowski E, Rochet J, La pollution aux PFAS : état des lieux des connaissances et enjeux de société, Académie des sciences (France), 2025.

<https://academie-sciences.hal.science/hal-05007695v1>

enjeux est rendue délicate car, trouver des données rendues publiques précises et détaillées sur les quantités de produits utilisés ou importés en France, notamment par secteurs, reste extrêmement difficile, voire impossible.

La crise internationale concernant ces produits s'est fortement étendue car des progrès importants en chimie analytique ont été accomplis ces dernières années permettant une meilleure connaissance et caractérisant l'ampleur de la contamination des compartiments de l'environnement (eaux superficielles et souterraines, air, sols) et sur des effets toxiques de certains PFAS.

Ainsi, la grande alerte mondiale concernant les PFAS repose sur :

- leur très faible dégradation dans l'environnement entraînant leur persistance sur l'ensemble de la planète ;
- des effets toxiques avérés de certaines de ces molécules pour la faune et l'humain et des phénomènes d'accumulation dans les organismes ;
- de très grands services rendus et une grande difficulté à les remplacer, notamment pour le bon fonctionnement d'objets et installations à pièces mobiles (automobile, aéronefs, chaînes de fabrication...), mais aussi dans les domaines de l'énergie, de l'électronique, du médical, du bâtiment ou encore pour le stockage de produits particulièrement agressifs (acides forts...);
- les grandes masses de ces produits et matériaux générées et utilisées dans le monde entier, du fait des caractéristiques précédemment citées ;
- l'absence de système de traçabilité préliminaire à une gestion efficace de la fin de vie de produits contenant des PFAS ainsi que de protocoles reconnus de voies de destruction/minéralisation pour tous les PFAS.

Le présent rapport examine les trois moments clefs de la vie de ces molécules et polymères :

- leurs fabrications;
- leurs usages;
- la fin de vie des produits et matériaux contenant ces molécules en identifiant les risques environnementaux et d'exposition à chacune de ces étapes, et en essayant de proposer des mesures ou des pistes de mise sous contrôle des usages, afin de réduire l'impact. Ceci pourrait permettre, en l'absence de substitution pertinente avérée, de maintenir l'utilisation dans des conditions strictes, contrôlées et documentées de certains de ces produits qui auraient été évalués comme indispensables et irremplaçables à de nombreuses industries. Ce rapport abordera le traitement des pollutions existantes, en particulier vis-à-vis du cycle de l'eau.

Il éclaire donc sur les enjeux et voies de solutions liés à ces thèmes.

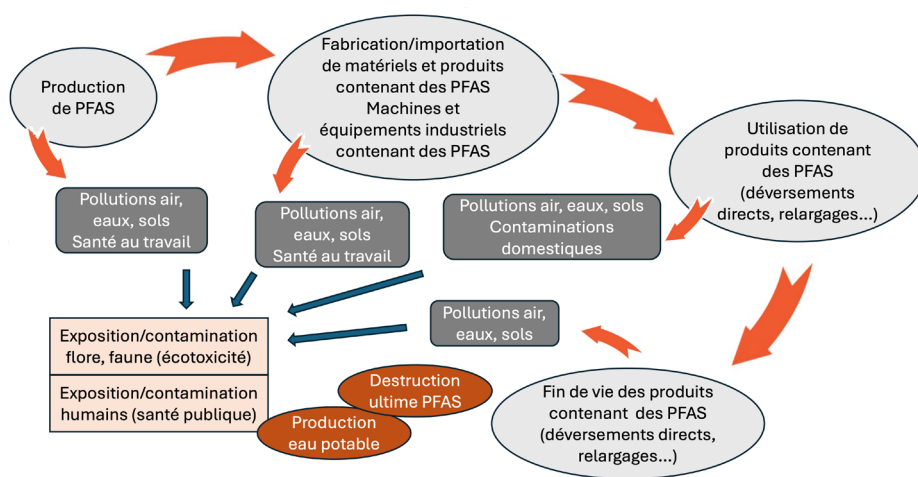


Figure 1: Schéma générique du chemin de vie des PFAS et impacts potentiels sur la santé et l'environnement, qui se décline selon la nature du PFAS (petites molécules ou polymères).

Le rapport vise à éclairer sur :

- la nécessité de partager une vision rigoureuse et objective de la famille des PFAS avec leurs natures, leurs risques associés, leurs importances ;
- la description de la pollution et ses défis associés ;
- l'évolution relativement rapide des réglementations internationales concernant les interdictions et restrictions de certains PFAS ;
- les priorités d'action incluant notamment la hiérarchisation des produits selon leur niveau de risques et d'importance industrielle, les substitutions, les exigences de productions sans risques de pollutions, la nécessité de développer les filières de collecte/destruction et de dépollution de l'environnement.

## Chapitre 1

# LES PFAS : DE QUOI PARLONS-NOUS ?

La généralisation du terme PFAS conduit trop souvent à des simplifications et des confusions en considérant que « tous les PFAS sont quasiment identiques », que tous sont des polluants et que tous sont dangereux.

L'OCDE donne une définition des PFAS révisée en 2021, comme :

« des substances fluorées qui contiennent au moins un atome de carbone (méthyl ou méthylène) totalement fluoré (sans atomes d'hydrogène, de chlore, de brome ou d'iode attaché), i.e. avec quelques exceptions, toute molécule avec au moins un groupe perfluoré ( $-\text{CF}_3$ ) ou un groupe méthylène perfluoré ( $-\text{CF}_2-$ ) »<sup>4</sup>.

Cette définition conduit inévitablement à une généralisation et prête à interprétation car elle ne tient pas compte du comportement physico-chimique spécifique de certains PFAS comme les polymères et donc de la très grande différence des impacts environnementaux et toxicologiques selon la nature de la molécule, du produit ou du matériau.

---

4 OCDE, *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance*, OECD Series on Risk Management of Chemicals, OECD Publishing, Paris, 2021. <https://doi.org/10.1787/e458e796-en>

## 1.1. DÉFINIR ET CONNAÎTRE LES CLASSES DE PFAS

Les PFAS forment une large famille de produits chimiques solides, liquides, visqueux ou gazeux. Ils ont en commun, dans leur structure chimique la présence de liaisons très fortes entre des atomes de carbone et de fluor formant des groupes fonctionnels à 2 ou 3 atomes de fluor ( $-\text{CF}_3$ ,  $-\text{CF}_2-$ ). À ce squelette fluorocarboné peuvent s'ajouter différents groupes fonctionnels (acides sulfonique, carboxylique, phosphonique, phosphinique, iodure, sulfonamide ou aldéhyde) conférant à ces molécules des propriétés physiques et chimiques distinctes. Ce sont aussi des molécules organiques dont un des groupements fonctionnels a été perfluoré pour apporter des propriétés physiques et chimiques uniques, d'intérêt majeur dans de nombreuses applications. Mais ceci se traduit aussi par une forte persistance et une résistance à la dégradation dans l'environnement, accompagnée le cas échéant d'effets toxiques sur les organismes.

La très grande diversité des molécules, produits et matériaux PFAS, leurs différents états physiques et leurs différentes propriétés font que les raisonnements sur leurs intérêts et leurs risques ne doivent pas se faire de manière globale, mais par type de PFAS, dont les grandes familles sont détaillées dans la figure 2.

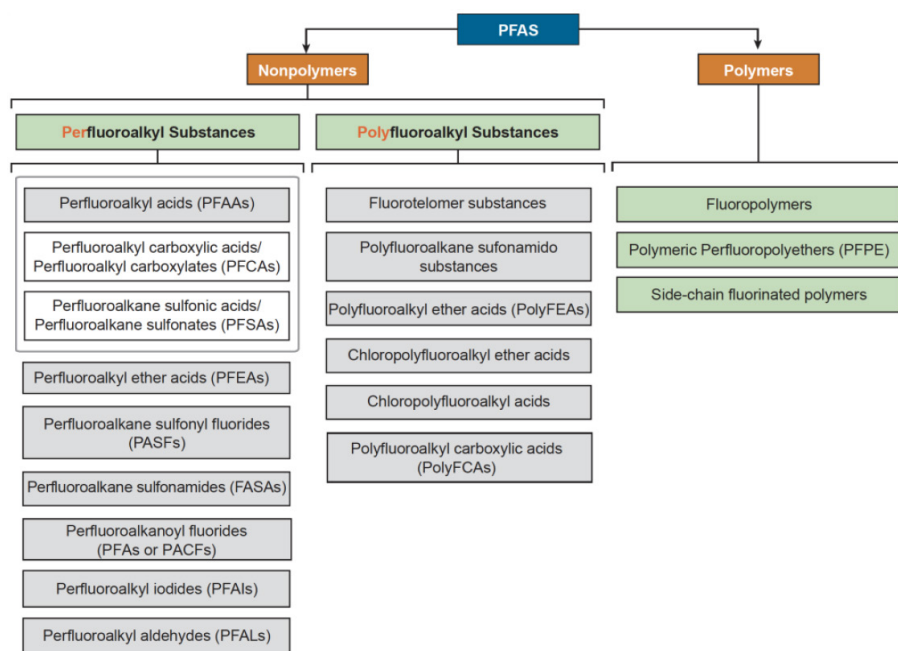


Figure 2: Répartition des grandes familles de PFAS selon leur structure en polymères ou non-polymères<sup>5</sup>.

## 1.2. NE PAS CONFONDRE PETITES MOLÉCULES ET POLYMÈRES

Au total, ce sont plus de 10 000 PFAS qui ont été répertoriés, ce qui représente donc une très large variété de produits, allant de petites molécules aux matériaux polymères (Figure 2), qui possèdent des profils de dangers et de risques très différents.

Les polymères de haute masse moléculaire, qui sont des matériaux inertes, stables, aux propriétés physiques et chimiques uniques et particulièrement recherchées, doivent être distingués des molécules de plus faible masse moléculaire (oligomères, télomères, molécules

5 ITRC Technical Regulatory Guidance, Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), 2023.  
<https://pfas-1.itrcweb.org/>

organiques à groupement fluoré). Ces dernières possèdent souvent un bas point de fusion ou d'ébullition, lié à la faible polarité des liaisons entre atome de carbone et de fluor ( $-CF_2-$  et  $-CF_3$ ) et aux faibles interactions moléculaires qui en résultent, conduisant à des composés très labiles et volatils. En fonction de leur polarité, elles sont souvent solubles dans l'eau et, pour les bas poids moléculaires, sont volatiles, ce qui facilite leur dispersion dans l'environnement (et leur accumulation puisque ces molécules sont généralement très stables).

Peuvent donc être considérées comme «petites molécules», celles de masses molaires inférieures à 500 grammes par mole (g/mol). Les oligomères présentent ensuite des masses molaires allant jusqu'à 1 500 g/mol. Suivent les polymères, macromolécules constituées par la répartition de motifs identiques ou différents les uns des autres, d'environ 1 500 g/mol jusqu'à 10 000 g/mol (et plus). De ce fait, les nombreux et très divers produits et matériaux PFAS ont des caractéristiques de structure chimique communes mais des aspects et comportements très différents: solides, visqueux, liquides, gazeux, très résistants et inertes, peu ou très solubles dans l'eau...

Pour autant, même si les molécules de grande masse molaire pourraient sembler moins problématiques à cause de leur stabilité exceptionnelle, de leurs très faibles interactions avec les systèmes biologiques et de leur résistance aux agressions chimiques, leur procédé de fabrication passe en général par la polymérisation ou l'association de petites molécules PFAS de basse masse moléculaire, dont il convient de contrôler rigoureusement l'emploi et les émissions vers l'environnement. De même, la dégradation ou la destruction thermique des molécules de grande masse moléculaire passe par la formation de molécules PFAS de petites masses moléculaires si la minéralisation n'est pas complète. Il est donc primordial de contrôler l'utilisation, les conditions d'usage et les risques d'exposition et de dispersion de ces molécules intermédiaires tout au long du dispositif de fabrication, de mise en œuvre, d'usage et de fin de vie (élimination, destruction...).

### 1.3. DIVERSITÉS DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES PFAS ET CONSÉQUENCES

D'une manière générale, les PFAS, et matériaux à base de PFAS sont extrêmement résistants à la dégradation du fait d'une grande stabilité chimique sous des environnements agressifs, de propriétés mécaniques très particulières, d'une bonne stabilité thermique et d'une stabilité à la biodégradation des groupements  $-CF_2-$  et  $-CF_3$ .

De telles caractéristiques constituent des atouts majeurs pour les élastomères et polymères aujourd'hui présentés comme indispensables par les industriels, faute d'alternatives de substitution performante. Ceci concerne de très nombreuses applications dans de multiples secteurs industriels, mais aussi des produits du quotidien et de nombreux usages dans le domaine de la santé et des équipements et instruments médicaux.

Toutefois, ces mêmes caractéristiques de stabilité et d'inertie chimique ou biologique font de ces molécules des contaminants persistants sur de très longues durées (d'où la qualification fréquente de « polluants éternels »), élément particulièrement préoccupant pour certaines petites molécules, monomères et oligomères de synthèse, intermédiaires ou auxiliaires de fabrications ou produits de dégradation ultime dans l'environnement comme l'acide trifluoroacétique (TFA). Certains de ces produits s'accumulent dans les milieux (eau, air, sols) et le biote, pouvant nuire à la santé humaine et animale.

#### « Éternels » ou non ? La question complexe de la persistance des PFAS

La liaison entre atome de carbone et atome de fluor (C-F) est particulièrement solide ce qui confère aux molécules fluorées une forte résistance à la dégradation. C'est principalement pour cette raison que l'atome de fluor a été employé pour fabriquer des molécules et polymères PFAS très résistants aux conditions extrêmes, aussi bien chimiques que mécaniques, justifiant leur très large usage et leurs succès pour de nombreuses applications. Malheureusement, cette forte résistance à la

dégradation explique également la persistance et la pollution planétaire par des PFAS qui sont alors classés au sein du groupe des polluants organiques persistants.

Si la dénomination de « polluants éternels », qui est associée à toute la famille des PFAS, est une image très employée et assez bien illustrative, elle est toutefois trop généraliste pour être scientifiquement rigoureuse, notamment lorsqu'il convient d'expliquer que la dégradation de certains PFAS génère d'autres PFAS, ce qui implique, de fait, une dégradation possible.

Les quelques dégradations possibles s'observent sur certaines molécules « précurseurs » et conduisent à de plus petites molécules, toujours porteuses de liaisons C-F, donc de plus petits PFAS, plus mobiles dans l'environnement. La minéralisation complète coupant la liaison C-F, comme elle se produit à très fortes températures, est très peu constatée dans la nature.

Les dégradations naturelles proviennent principalement de phénomènes d'hydrolyse, de photolyse, d'oxydo-réduction, en dehors, ou dans des organismes biologiques (biodégradations/biotransformations). Ces capacités de dégradations naturelles, pouvant être très rapides, lentes, très lentes (ou même quasiment impossibles), sont totalement dépendantes de la structure des molécules ou polymères, des conditions environnementales (lumière, eau, salinité, biomasse...) ou du type d'organisme en présence.

Les biodégradations des PFAS ne sont pas suffisamment efficaces dans les milieux naturels. Selon Harris *et al.*<sup>6</sup>, le fluor biologique est rare car la stabilité thermodynamique de la liaison C-F n'apporterait aucun bénéfice énergétique à la cellule lorsqu'elle est réduite. De plus, l'énergie importante nécessaire pour la dissociation peut entraîner une perte d'énergie sur les ressources de la cellule. En complément, cette réduction de C-F produirait probablement du fluorure dont la toxicité intracellulaire pour

---

6 Harris BA, Zhou J, Clarke BO, Leung IKH Enzymatic Degradation of PFAS: Current Status and Ongoing Challenges, *ChemSusChem*, 2025, 18, e202401122.

les bactéries est bien documentée. Un autre facteur clé limitant la dégradation intracellulaire des PFAS est leur biodisponibilité et leur absorption cellulaire limitées, résultant de leur nature hydrophobe et tensioactive.

Des biodégradations partielles de certains PFAS ont été observées en laboratoire et présentées dans la revue de Zhang *et al.*<sup>7</sup> mais sans conduire à la minéralisation des molécules.

Guelfo *et al.*<sup>8</sup> décrivent quelques schémas de dégradations mais concluent que la dynamique complexe de la biotransformation rend difficile la prédiction précise des quantités produites d'acides perfluoroalkyles (PFAA) les plus mobiles dans l'environnement. Pour améliorer la prévisibilité, une meilleure caractérisation des voies de dégradation biotique et abiotique dans les milieux pertinents est nécessaire, tant pour les précurseurs anciens que pour les précurseurs nouvellement apparus.

Des hypothèses de dégradation de certains PFAS par voie enzymatique extra-cellulaire ont été abordées. Les hypothèses de défluorination enzymatique sont décrites par Wackett<sup>9</sup> qui cite des enzymes défluorinases hydrolytiques appartenant en grande partie aux superfamilles des  $\alpha/\beta$ -hydrolases ou des haloacides déshalogénases. Aucune solution d'applications à court terme n'apparaît à court terme et les conclusions sont orientées vers des besoins de recherche.

Harris *et al.*<sup>10</sup> concluent que les enzymes laccase et peroxydase ont montré un potentiel de dégradation indirecte des molécules PFOA et PFOS, mais précisent que les preuves de leur efficacité restent incomplètes et

- 7 Zhang Z, Sarkar D, Buswas JK, Datta R Biodegradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review, *Bioresource Technol.*, 2022, 344, 126223.
- 8 Guelfo JL, Korzeniowski S, Mills MA, Anderson J *et al.* Environmental Sources, Chemistry, Fate, and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: State of the Science, Key Knowledge Gaps, and Recommendations Presented at the August 2019 SETAC Focus Topic Meeting, *Environ. Toxicol. Chem.*, 2021,40, 12, 3234–3260.
- 9 Wackett LA, Confronting PFAS persistence: enzymes catalyzing C–F bond cleavage, *Trends Biochem.*, 2025, *Sci.*, 50, 1, 71-83.
- 10 Harris BA, Zhou J, Clarke BO, Leung IKH, Enzymatic Degradation of PFAS: Current Status and Ongoing Challenges, *ChemSusChem*, 2025, 18, e202401122.

nécessitent des travaux plus approfondis en évoquant des biais analytiques.

De nombreuses transformations biologiques de molécules perfluoroalkylées sont décrites qui conduisent notamment à la formation de PFOS et PFOA sans aller jusqu'à la minéralisation. Des revues décrivent ces éléments complexes<sup>11,12</sup>. Sur des systèmes microbiens ou dans des organismes de rats ou de souris, il se produit des dégradations des fonctions non fluorées, des groupements polyfluoroalkylés et perfluoroalkylés, pouvant donner naissance à des acides perfluoroalkylcarboxyliques (PFCA) et sulfoniques (PFSA), tels que l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) et l'acide perfluorooctane sulfonique (PFOS).

L'acide trifluoacétique (TFA), produit de dégradation d'autres molécules, est très persistant ce qui conduit à des concentrations croissantes accumulées dans les milieux et les organismes<sup>13</sup>. Il ne s'est pas dégradé dans des expériences de laboratoire et des suivis de la qualité d'étangs pendant un an<sup>14</sup>.

Une revue décrit divers procédés pouvant être envisagés pour la réhabilitation « verte » d'environnements pollués mais se limite au PFOS et au PFOA<sup>15</sup>. Ruyle *et al.*<sup>16</sup> ont développé un modèle du devenir de différents PFAS dans les eaux souterraines sur un site militaire ayant servi à des exercices de lutte contre les incendies. Les prévisions du modèle, si

- 11 Butt CM, Muir DCG, Mabury S.A. Biotransformation pathways of fluorotelomer-based polyfluoroalkyl substances: A review, *Environm. Toxicol. Chem.*, 2014, 33, 2, 243-267.
- 12 Liu J, Avendaño SM Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environ. Int.*, 2013, 61 98-114.
- 13 Gredelj A, Glüge J Scheringer M, Cousins T, The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA) Arp HPH, *Environ. Sci. Technol.*, 2024, 58, 45, 19925-19935.
- 14 Ellis DA, Hanson ML, Sibley PK, Shahid T *et al.*, The fate and persistence of trifluoroacetic and chloroacetic acids in pond waters, *Chemosphere*, 2001, 42, 3, 309-318.
- 15 Chen F, Zhou Y, Wang L *et al.* Elucidating the degradation mechanisms of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in various environmental matrices: a review of green degradation pathways, *Environ Geochem Health*, 2024, 46, 349.
- 16 Ruyle BJ, Thackray CP, Butt CM *et al.* Centurial Persistence of Forever Chemicals at Military Fire Training Sites. *Environ. Sci. Technol.*, 2023, 57, 8096-8106.

aucune action de remédiation n'était menée et avec toutes les réserves liées à l'imprécision du modèle, conduisent à des présences de PFAS pendant plusieurs centaines d'années.

Pour des dégradations « non biologiques », un exemple décrit est celui de l'oxydation atmosphérique des alcools fluorotélomères, qui conduit à la génération d'aldéhydes polyfluorés correspondants, transformés ensuite en *acides carboxyliques perfluorés* PFCA.

Pour Guelfo *et al.*<sup>17</sup>, les FTOHs (fluorotélomère alcools) se dégraderaient relativement rapidement (moins de 2-30 jours) en produisant des PFCA et d'autres acides polyfluoroalkyls, cétones et alcools selon différents schémas de dégradation. Pour des précurseurs de masse moléculaire relativement élevée, plusieurs fluoroalkyl à chaînes latérales, polymères des temps de demi-vie de plusieurs mois à des centaines d'années sont décrits<sup>18</sup>.

Face à ce sujet aussi important de la persistance des PFAS dans la nature et à cette dénomination de « polluants éternels » le nombre d'études sur la durée de vie des principales familles de PFAS apparaît très limité. Entre certains précurseurs se découpant assez vite et des polymères à résistance quasi illimitée, de nombreuses études présentent des exemples de dégradations, essentiellement par des procédés d'oxydation avancée ou des tentatives de biodégradation dans l'optique de développer des systèmes de traitement de dépollution. La littérature ne fait pas apparaître, à ce jour, de documents rassemblant des données chiffrées, par groupes de PFAS, concernant leurs durées de vie dans l'environnement et la hiérarchisation des niveaux de persistance.

Il est donc d'importance majeure, pour chaque type de PFAS en cause (comme pour toutes les molécules polluantes en général), et pour

---

17 Guelfo JL, Korzeniowski S, Mills MA, Anderson J *et al.* Environmental Sources, Chemistry, Fate, and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: State of the Science, Key Knowledge Gaps, and Recommendations Presented at the August 2019 SETAC Focus Topic Meeting.

18 Liu C, Liu J, Aerobic biotransformation of polyfluoroalkyl phosphate esters (PAPs) in soil, *Environ. Poll.*, 2016, 212, 230-237.

orienter les décisions de gestion visant à prévenir des risques et aider à la dépollution, de connaître, pour chaque molécule ou polymère en cause leurs caractéristiques fondamentales et leurs procédés et voies industrielles de fabrications :

- la taille des molécules / leur masse moléculaire : les plus petits PFAS sont plus volatils, solubles dans l'eau et donc plus facilement dispersés dans l'environnement. Les polymères, de grande taille, sont solides et peuvent être gérés comme des objets, à la condition de savoir les identifier, les isoler et les récupérer aisément en particulier en fin de vie en vue de leur recyclage ou de leur destruction ;
- la volatilité conditionne leur capacité à diffuser dans l'air et être inhalés. Elle varie aussi en fonction de la température ;
- la capacité de partage de solubilité entre l'eau et les graisses, l'affinité pour l'une étant opposée à l'autre.

Les plus solubles dans l'eau vont largement diffuser dans l'environnement, pénétrer dans les organismes biologiques, et être plus facilement évacués et parfois métabolisés par ces organismes.

Les plus compatibles ou solubles dans les graisses et les huiles possèdent la capacité de s'accumuler dans les graisses des organismes vivants et donc de favoriser une bioaccumulation et une bioamplification des concentrations internes. Ils parcourent ainsi la chaîne alimentaire. Ils peuvent aussi franchir des barrières de protection telles que la peau, les barrières hémato-encéphalique ou placentaire. En termes de dépollution, ils se fixent plus aisément sur du charbon actif. Les groupements  $-CF_2-$  et  $CF_3$ , à la fois hydrophobes mais aussi oléophobes, perturbent fortement les raisonnements appliqués aux molécules hydrocarbonées plus traditionnelles sans qu'un recul suffisant permette de tirer des conclusions sur ces changements, conduisant alors à préconiser un raisonnement reposant sur la prudence et la précaution.

La toxicité : chaque molécule possède une capacité à induire un effet biologique qui, selon la concentration locale, la cible d'action et la sensibilité d'un organisme, provoque un ou plusieurs effet(s) toxique(s).

La nature et l'intensité des effets peuvent être différents selon le type d'organisme (poisson, rat, souris, humain...) et selon le mode d'exposition (ingestion, inhalation, contact cutané), avec des différences considérables entre les espèces (Tableau 3). Une différence de sensibilité entre les sexes des mammifères est constatée (Tableau 1).

Tableau 1: Exemples illustrant des différences de concentrations sans effet indésirable biologique observé (unités: mg/kg de masse corporelle/jour) pour quelques petite molécules PFAS chez le rat<sup>19</sup>.

|             | PFBS | PFHxS | PFBA | PFHxA | 6:2 FTOH |
|-------------|------|-------|------|-------|----------|
| Rat mâle    | 60   | -     | 6    | 50    | 5        |
| Rat femelle | 600  | 3     | 30   | 200   | 25       |

Les caractéristiques évoquées précédemment conditionnent la pénétration et le devenir du PFAS examiné dans l'organisme et atteindre la, ou les, cible(s) de ses effets. Ensuite, l'interaction avec des éléments cellulaires provoque la toxicité. Une petite différence de structure chimique entre deux molécules peut changer faiblement ou totalement l'effet ou l'intensité de toxicité. C'est une des raisons qui fait que prédire les effets d'un mélange de molécules est très difficile, voire impossible. Toutefois, lorsque la cible est identique pour plusieurs molécules, il est possible d'additionner les effets individuels. La somme de plusieurs molécules, à une concentration n'induisant pas d'effet toxique individuel, peut alors conduire à une somme totale à effet toxique significatif.

<sup>19</sup> Danish Environmental Protection Agency, Short-chain Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) A literature review of information on human health effects and environmental fate and effect aspects of short-chain PFAS, 2015, ISBN 987-87-93352-15-5.

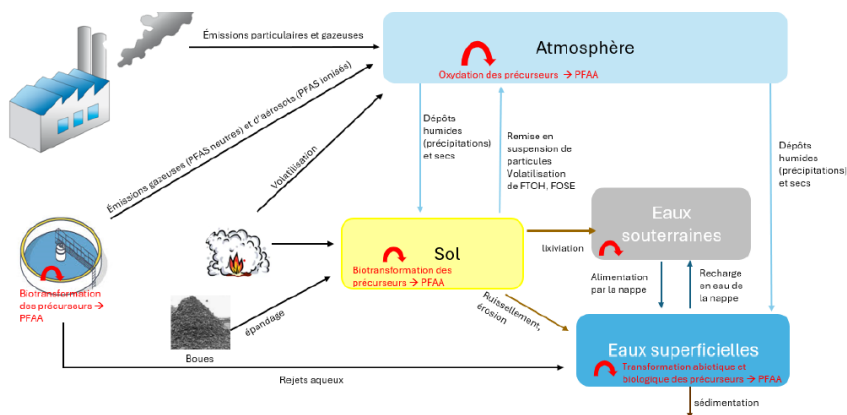


Figure 3 : Principales sources d'émissions de PFAS dans l'environnement et principaux mécanismes de transfert vers et entre les milieux environnementaux<sup>20</sup>.

Trois exemples permettent d'illustrer les différences qu'il convient de porter aux divers PFAS et la difficulté à établir une analyse de l'impact d'un composé chimique particulier sans recourir à l'analyse de son cycle de vie : production, usage et finalement exposition accidentelle hors des champs d'usage recommandée et enfin destruction :

**L'acide perfluorooctanoïque (PFOA)** a été utilisé comme intermédiaire de fabrication des polymères perfluorés de haute masse moléculaire mais aussi comme agent de traitement de surface. C'est une molécule très soluble dans l'eau, identifiée en Europe dans le cadre du règlement REACH comme « substance extrêmement préoccupante ».



Figure 4 : Formule de la molécule PFOA. Masse molaire 414 g/mol.  
Solubilité dans l'eau 9,5 g/L.

20 Ineris, Identification des principales voies d'exposition aux PFAS, 2025, Rapport 229253 - 2808401 - v2.0.  
<https://www.ineris.fr/fr/identification-principales-voies-exposition-pfas>

Cette molécule est soumise à une procédure de restriction et ne peut plus être fabriquée et mise sur le marché depuis le 4 juillet 2020. Le règlement POP (polluants organiques persistants) issus de la Convention de Stockholm<sup>21</sup> a interdit le PFOA depuis juillet 2020. Cancérigène et à forte valeur de bioaccumulation, elle a non seulement été utilisée en production de PFAS, mais est également un produit de dégradation de certains PFAS.

Selon l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), le PFOA est considéré comme une molécule toxique, très persistante et bioaccumulable par l'Agence européenne pour la chimie (ECHA), dans le cadre du règlement REACH. Elle est considérée comme particulièrement résistante à la biodégradation : virtuellement aucune dégradation n'est observée dans des conditions correspondant aux environnements naturels. Elle est bioaccumulative, en particulier pour l'être humain, pour lequel elle est également considérée comme reprotoxique (classée 1B pour la reproduction)<sup>22</sup>.

Des molécules similaires comme le PFOS (perfluorooctylsulfonic acid), des oligomères fluorés ou perfluorés présentant des propriétés tensioactives et utilisés industriellement comme intermédiaires de fabrication, présentent aussi des effets significatifs sur la santé ou l'environnement mais sans que ces propriétés soient aujourd'hui aussi documentées et connues que celles du PFOA.

**Le polytétrafluoroéthylène (PTFE) :** Ce matériau très connu est notamment utilisé comme revêtement anti-adhésif dans les poêles ou instruments de cuisson, comme joint d'étanchéité ou comme lubrifiant ou imperméabilisant dans des produits grand public, très largement vendus.

---

21 <https://www.pops.int/Implementation/IndustrialPOPs/PFAS/Overview/tabid/5221/Default.aspx>

22 Brignon JM, Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : PFOA (acide perfluorooctanoïque et ses sels, et leurs précurseurs), 2015, Ineris DRC-15-136881-09932A. [https://perfluores.substitution.fr/sites/substitution-perfluores/files/documents/fte\\_pfoa\\_acide\\_perfluorooctanoïque\\_et\\_ses\\_sels\\_et\\_leurs\\_precurseurs\\_2015\\_0.pdf](https://perfluores.substitution.fr/sites/substitution-perfluores/files/documents/fte_pfoa_acide_perfluorooctanoïque_et_ses_sels_et_leurs_precurseurs_2015_0.pdf)

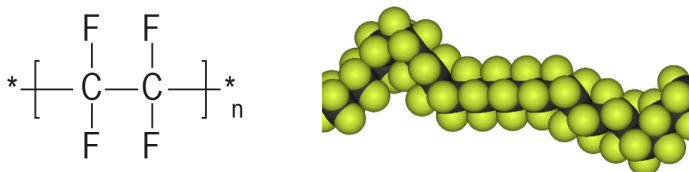


Figure 5 : Formule de la composition du PTFE. n signifie que le groupe présenté est répété n fois pour constituer de très grandes chaînes polymères à très forte résistance comme illustré (Image Wikipédia).

Ce solide, réputé pour sa stabilité, ses propriétés électriques exceptionnelles, sa résistance à de nombreux produits chimiques agressifs, à l'abrasion, est un produit particulièrement inerte dans la plupart des usages et conserve ses propriétés entre moins 100 °C et plus 250 °C. Le PTFE en lui-même ne pose donc pas de problèmes de pollution ou de risque sanitaire et rend même de très nombreux services. C'est au niveau de sa fabrication par polymérisation du tétrafluoroéthylène que pouvait être utilisé notamment un autre PFAS, l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) comme expliqué plus haut figurant parmi les polluants PFAS les plus fréquemment retrouvés dans le monde et classé cancérigène et aujourd'hui interdit depuis 2020 dans l'Union européenne. Le PFOA pouvait être présent comme impureté résiduelle dans les produits industriels, mais pas dans les produits finis tels que les ustensiles de cuisine. Ces traces résiduelles étaient en effet détruites lors de la cuisson des revêtements.

Mais les producteurs et les transformateurs de PTFE ont, depuis plusieurs années, engagé la mise en œuvre de PTFE synthétisés sans PFOA, et en contrôlant rigoureusement l'absence. Néanmoins, la nature des procédés utilisés ou des composés remplaçant le PFOA n'est pas toujours précisée par tous les industriels dans le monde. En cas de production peu ou pas contrôlée, particulièrement en dehors de l'Union européenne, des molécules perfluorées dont la toxicité ou la persistance dans l'environnement restent préoccupantes peuvent être trouvées certains présentant même des risques similaires, voire supérieurs au PFOA pour la santé humaine ou l'environnement. L'exposition du PTFE à des températures anormalement élevées, supérieures à 350 °C peut conduire à la production de divers composés intermédiaires de petites tailles et proches des molécules perfluorées incriminées. C'est pour cette

raison que les industriels recommandent généralement un usage de leurs produits à des températures raisonnables.

**La fluoxetine:** c'est un médicament important (Prozac®), psychotrope antidépresseur qui comporte un groupement  $-CF_3$  qui le classe parmi les molécules PFAS.

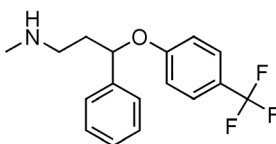


Figure 6: Formule de la fluoxetine. Masse molaire 309 g/mol. Solubilité dans l'eau 14 g/L.

Compte tenu de son importance en santé publique, cette molécule est classée parmi les médicaments essentiels par l'Organisation mondiale de la santé<sup>23</sup>. Son usage important conduit à une dispersion dans l'environnement car elle est très soluble dans l'eau, possède une demi-vie dans le corps de 1 à 5 jours avec une élimination à 80 % dans les urines. Elle est considérée comme faiblement bioaccumulable<sup>24</sup>. Des concentrations de quelques dizaines de nanogrammes par litres ont été mesurés dans certaines rivières. La molécule est biodégradable (80 % en 20 jours)<sup>25, 26</sup>, s'adsorbe sur les sédiments, s'hydrolyse très peu et se dégrade lentement à la lumière dans des eaux de rivières en conditions naturelles avec un temps de demi-vie d'environ 60 heures dans une eau naturelle<sup>27</sup>.

23 World Health Organization, The selection and use of essential medicines, 2023. <https://iris.who.int/handle/10665/371090>

24 Oakes KD, Coors A, Escher BI *et al.*, Inhibitor Fluoxetine: Case Study Using the European Risk Assessment Framework, *Integr. Environm. Assess. Management*, 2010, 6, 1, 524–539.

25 Velázquez YF, Nacheva PM, Biodegradability of fluoxetine, mefenamic acid, and metoprolol using different microbial consortiums. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, 24: 6779–6793.

26 Khan MF, Murphy CD, Bacterial degradation of the anti-depressant drug fluoxetine produces trifluoroacetic acid and fluoride ion, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2021 105: 9359–9369.

27 Souza LP, Carneiro JGM, Lastre-Acosta AM, Ramos B, Teixeira ACSC, Environmental Persistence of the Antidepressant Fluoxetine and Its Pharmaceutical Alternative: Kinetics of Oxidation and Mathematical Simulations, *Water*, 2022, 14, 3536. <https://doi.org/10.3390/w14213536>

Parmi ses produits de dégradation dans les milieux naturels figure l'acide trifluoroacétique, métabolite de nombreux perfluorés, très largement présent dans les eaux et à niveau de toxicité estimé faible pour les mammifères mais suspecté d'être perturbateur de la reproduction<sup>28</sup>. De très nombreux médicaments ou molécules actives en agrochimie sont des molécules fluorées pouvant conduire après dégradation dans l'environnement à la production de molécules de dégradation comme l'acide trifluoroacétique et présenter donc des problématiques similaires.

**Éléments clés:** La vaste famille chimique des PFAS comporte de très nombreuses molécules et polymères. Les produits et matériaux PFAS possèdent des caractéristiques de structure chimique communes mais des aspects et comportements physico-chimiques très différents: solides, visqueux, liquides, gazeux, très résistants et inertes, peu ou très solubles dans l'eau. Ces différences conditionnent des persistances et pollutions environnementales différentes et des effets différents sur les organismes biologiques.

---

28 Arp HPH, Gredelj A, Glüge J, Scheringer M, Cousins IT., The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA), *Environ. Sci. Technol.*, 2024, 58, 45, 19925-35.

## Chapitre 2

### **LA TRÈS LARGE DIVERSITÉ DES USAGES ET L'IMPORTANCE TECHNOLOGIQUE DES PFAS**

Le développement considérable de l'usage des PFAS sous leurs différentes formes est lié à de très nombreuses fonctions d'intérêt dans des domaines industriels et des produits d'usage courant très variés. Selon les domaines, les fonctions utilisées sont essentiellement la capacité à repousser l'huile ou l'eau, la résistance à de fortes températures, la résistance à des agents chimiques très agressifs, la limitation des frottements, la stabilité et la durabilité. Le tableau 2 donne une série d'exemples, non limitative, de ces fonctions et domaines d'application.

L'usage des PFAS s'est largement généralisé dans les processus et les produits finis depuis les années 1940 en raison de leurs combinaisons de propriétés uniques : un caractère oléophobe et hydrophobe, des énergies et tensions de surface très faibles, de très faibles coefficients de frottement, de bonnes propriétés d'allongement à la rupture mais des comportements de moindres performances (fatigue, fluage, résistance mécanique limitée), une très grande stabilité thermique et une excellente stabilité chimique. Plusieurs dizaines de fonctions et applications exploitent ainsi leurs propriétés : par exemple les comportements mécanique, lubrifiant, stabilisant, moussant, émulsifiant, dispersant et répulsif (antiadhésif, antitache, imperméabilisant), conducteurs, diélectriques, mais aussi actifs pharmaceutiques et agrochimiques.

Les PFAS sont utilisés dans un très grand nombre de domaines, touchant le grand public ou plus industriels, souvent sans que cette utilisation soit connue ou explicitée. Les éléments contenant des PFAS sont souvent présents, en quantités très différentes, au sein de produits et de chaînes industrielles complexes, ce qui les rend difficiles à isoler et identifier de façon systématique en absence de déclaration explicite d'usage.

Quasiment tous les secteurs industriels sont concernés par l'utilisation des PFAS, des petites molécules aux polymères: semiconducteurs, batteries lithium, chimie et pétrochimie, aéronautique et spatial, mines, métallurgie, peintures, cosmétiques, textile, imprimerie, alimentaire, véhicules, construction et matériaux, défense...

Les PFAS sont aussi présents en abondance en particulier dans les pièces mobiles ou au contact de produits agressifs et corrosifs des usines, qui ne pourraient pas fonctionner sans leur utilisation: pour les revêtements de réacteurs soumis à des conditions agressives (pH, température, atmosphère corrosive...), ou dans de nombreuses parties des montages de fabrication (tuyaux, joints, graisses, pompes, moules...).

Le tableau 2, loin d'être exhaustif, illustre des exemples de produits et matériaux PFAS employés selon les familles de destination et d'usages. Une description des molécules concernées et de leurs voies d'accès peut-être trouvée dans la référence<sup>29</sup>.

Tableau 2: Exemples de produits et matériaux PFAS employés selon les familles de destination et d'usages. Ce tableau, ni exhaustif ni limitatif, illustre le nombre considérable de domaines concernés.

| Filières                          | Principaux PFAS <sup>30</sup> utilisés (non limitatif) | Fonctions principales                                            |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Aéronautique                      | PFPE, FKM, PVDF, ECTFE                                 | Lubrifiant, ignifugeant, antiadhésif, stabilité thermique,...    |
| Agrochimie                        | Petites molécules                                      | Molécules actives en formulation                                 |
| Alimentaire (emballages, papiers) | PTFE, FKM                                              | Antiadhésif, hydrophobe, oléophobe                               |
| Automobile                        | PTFE, PFPE, FKM, PVDF                                  | Protection thermique, chimique, résistance mécanique, électrique |

29 Améduri B, Les (co)polymères fluorés : propriétés exceptionnelles pour des matériaux de haute valeur ajoutée, Actualité Chimique, septembre 2017, 421, 22.

30 Cf. Glossaire et acronymes

| Filières                                                                 | Principaux PFAS <sup>30</sup><br>utilisés (non limitatif) | Fonctions principales                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bâtiment (toitures, sols, bardages, volets/portes)                       | ECTFE, PVDF                                               | Stabilité chimique, thermique, UV                                                             |
| Batteries                                                                | PVDF                                                      | Stabilité chimique et thermique, conductivité ionique                                         |
| Câblerie                                                                 | ECTFE, PTFE, FKM                                          | Résistance au feu, résistance chimique, isolation électrique                                  |
| Cosmétiques et produits de soins personnels                              | PTFE, polyéthers fluorés                                  | Émulsifiant, moussant, mouillant                                                              |
| Cuisine (ustensiles divers)                                              | PTFE                                                      | Antiadhésif, résistance thermique                                                             |
| Électronique et semi-conducteurs                                         | PFPE, polyéthers fluorés, F-polyimides, PVDF              | Protection thermique, chimique, résistance mécanique, tensio-actifs                           |
| Gaz réfrigérants                                                         | HFC (F-methane, éthane)                                   | Réfrigérant                                                                                   |
| Hydrogène (piles à combustible polymères)                                | PFSA                                                      | Conductivité, stabilité chimique, thermique et à l'oxydation                                  |
| Industrie manufacturière (tubes, joints, réacteurs, vannes,...)          | PTFE, FKM, ECTFE, PFPE, PVDF                              | Résistance chimique aux environnements ultra-agressifs, résistance thermique, à la pression   |
| Lubrifiants industriels                                                  | PFPE                                                      | Faible coefficient de frottement, résistance aux très hautes pressions                        |
| Médical (Implants, Équipements, Appareils ou fournitures, dont textiles) | FKM, PTFE, PVDF, HFO/HFC                                  | Stabilité chimique, faible friction, pouvoir diélectrique, réfrigérant                        |
| Mousses anti-incendie                                                    | Polyéthers fluorés                                        | Effet moussant, ignifugeant                                                                   |
| Membranes de filtration                                                  | ECTFE, PVDF                                               | Stabilité chimique, thermique et mécanique, microporosité                                     |
| Pétrole et activité minière                                              | Polyéthers fluorés, PTFE, PVDF, FKM                       | Émulsifiant, faible friction, inertie chimique, propriétés diélectrique, résistance thermique |
| Peintures, Revêtements ou vernis                                         | PTFE                                                      | Adhésion, Résistance à l'abrasion, stabilité chimique et thermique                            |

| Filières                             | Principaux PFAS <sup>30</sup> utilisés (non limitatif) | Fonctions principales                                                         |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Photovoltaïque                       | ECTFE, PVDF                                            | Stabilité chimique et thermique                                               |
| Pompes à chaleur (liquides utilisés) | HFC (F-méthane, éthane)                                | Transfert thermique                                                           |
| Pharmacie                            | Petites molécules                                      | Molécules actives des médicaments                                             |
| Textiles                             | PTFE                                                   | Imperméabilisation (eau et huile) antitache, résistance thermique et chimique |

**Éléments clés :** De très nombreux produits et matériaux PFAS sont employés dans de très nombreux secteurs aussi bien pour le bon fonctionnement des procédés industriels que dans les produits commercialisés. Parmi ces usages, certains sont de grande importance ce qui implique de les hiérarchiser en relation avec les risques liés aux produits employés.

## Chapitre 3

# PRINCIPAUX PROBLÈMES À L'ORIGINE DE LA CRISE

### 3.1. UNE CONTAMINATION UBIQUITAIRE SUR LA PLANÈTE (AIR, EAUX, SOLS)

La présence ubiquitaire de certains PFAS dans l'environnement (TFA ou les petites molécules PFCAs illustrées dans les figures de ce chapitre) correspond à leurs capacités de solubilité dans l'eau, leurs volatilités, leurs persistances face aux dégradations biologiques et physico-chimiques et les quantités utilisées.

Les progrès obtenus dans les méthodes d'analyse de ces molécules et des grandes campagnes d'échantillonnages ont été réalisées notamment en Europe, dont les résultats sont disponibles en particulier sur le site du « PFAS Data Hub » du CNRS<sup>31</sup>. Il montre une large diffusion générale des pollutions mais également des zones d'émissions plus spécifiques correspondant à des activités industrielles concernées.

#### DANS LES EAUX

Les eaux superficielles et souterraines sont un réceptacle final des pollutions anthropiques et, compte tenu de leur usage pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, voient leur qualité soumise à de nombreuses surveillances analytiques. Ainsi, depuis plus de 20 ans, la présence de PFAS a été révélée puis largement étudiée permettant de disposer de données descriptives de la pollution globale. La connaissance reste toutefois encore incomplète selon la diversité des molécules en cause et selon les pays. Les figures 5, 6 et 7 illustrent la large diffusion de certains PFAS dans les eaux continentales et marines.

---

31 CNRS, PFAS Data Hub. <https://pdh.cnrs.fr/fr/>

# LES MOLÉCULES ET MATÉRIAUX PER- ET POLYFLUOROALKYLÉS (PFAS) IMPORTANCE INDUSTRIELLE ET GESTION

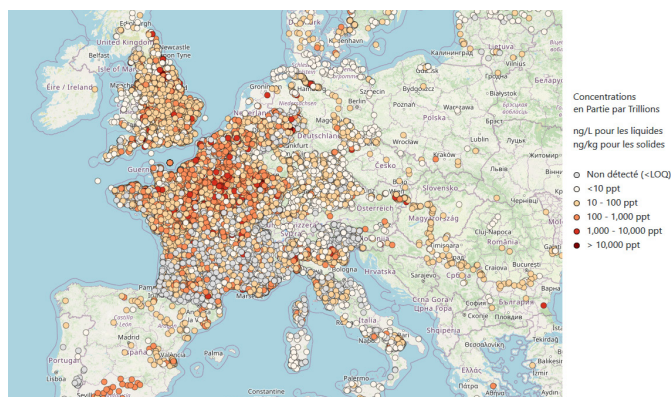


Figure 7: Exemple de présence de PFAS dans des eaux superficielles. Selon les points et les pays, il peut s'agir de molécules différentes<sup>32</sup>.

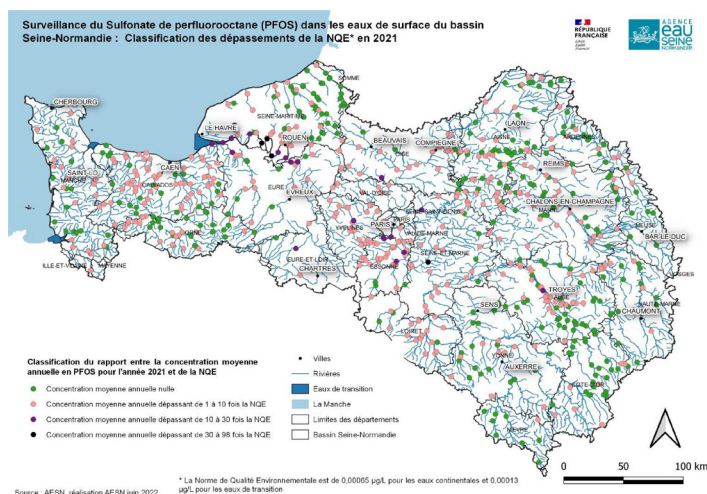


Figure 8: Exemple de bilan 2021 des concentrations en sulfonate de perfluorooctane (PFOS) dans les eaux superficielles du bassin Seine-Normandie avec classification des dépassements de la norme européenne de qualité des eaux (NQE) montrant de fortes concentrations sur des sites en Île de France et le bassin de la Seine en aval de Rouen<sup>33</sup>.

32 PFAS Data Hub CNRS - <https://pdh.cnrs.fr/fr/map/>

33 Agence de l'eau Seine-Normandie, La contamination par les composés perfluorés dans le bassin Seine-Normandie, 2023.  
<https://www.calameo.com/agence-de-l-eau-seine-normandie/read/004001913c44743763bf7>

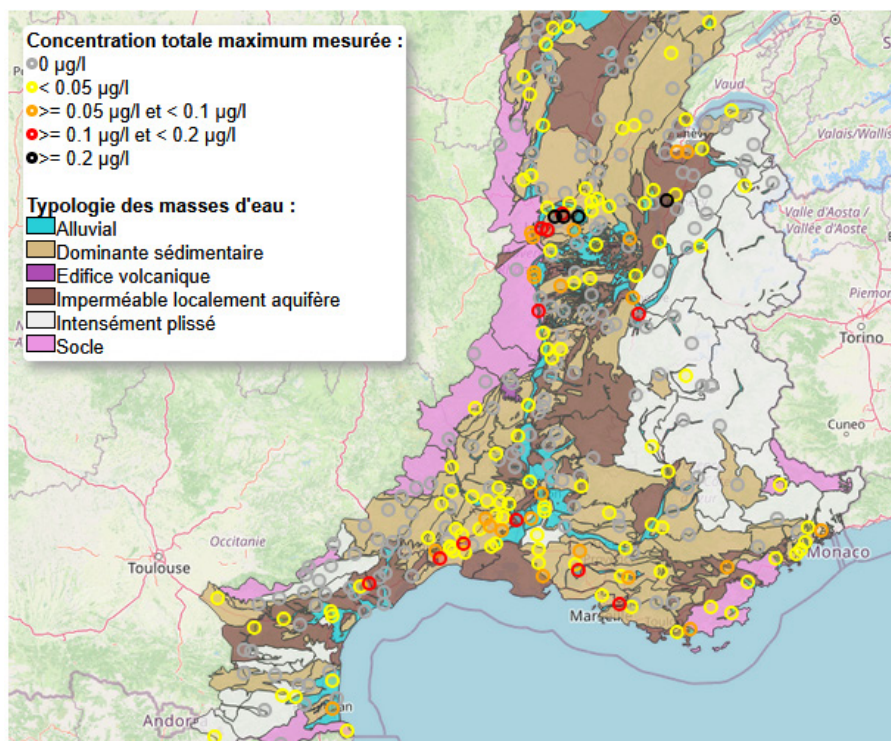


Figure 9 : Exemple de concentrations totales mesurées en PFAS dans des eaux souterraines par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse<sup>34</sup>.

Des situations locales liées à des émissions ponctuelles de rejets contaminés sont explorées depuis peu.

Des données récentes, exploitées en 2025 par l'association Générations Futures<sup>35</sup>, montrent que sur 2700 installations industrielles classées pour l'environnement (ICPE), 146 établissements rejettent, dans leurs effluents aqueux, des quantités de PFAS > 1g/j et/ou des concentrations en total PFAS > 25µg/L.

34 Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.  
<https://qualite-eau.eaurmc.fr/rapports/qualite-eau/Eaux-souterraines/Contamination-pfc-eso.html>

35 Générations futures, État des lieux des rejets de PFAS par les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), 2025.  
<https://www.generations-futures.fr/actualites/rejets-pfas-icpe/icpe-pfas-avril-2025/>

Ils seraient responsables de plus de 99 % des rejets vers le milieu naturel ou une station d'épuration urbaine. L'analyse identifie plusieurs secteurs d'activité responsables d'émissions importantes comme la synthèse de pesticides PFAS et de médicaments, le traitement de surface des métaux, le recyclage et le traitement des déchets, l'usage de mousse anti-incendie sur les sites industriels. 575 ICPE sont raccordées à des stations d'assainissement des eaux usées urbaines (STEU), non conçues pour traiter les PFAS.

Un exemple de suivi spécifique est donné sur la figure 10 pour un site industriel dans l'Oise diffusant des PFAS dans les rejets aqueux vers l'environnement. Le comportement « suspect » de la station d'épuration collective montrant une concentration supérieure de PFAS en sortie par rapport à l'entrée serait, selon les gestionnaires de la station, liés à des difficultés analytiques dans ces matrices complexes, comportant la présence de matières en suspension. Néanmoins, l'observation d'une valeur plus élevée de PFAS en sortie de station d'épuration des eaux usées est également relevée par d'autres auteurs dont Lenka *et al.*<sup>36</sup> qui publient une synthèse des articles concernant les stations d'eaux usées urbaines. Des PFAS à courtes et longues chaînes sont largement détectés dans les eaux usées en entrée (supérieur à 1 000 ng/L) et dans les effluents (15 à plus de 1 500 ng/L). La plupart des STEU des pays concernés montrent une faible efficacité d'élimination avec de nombreux signalements de concentrations supérieures en sortie de traitement.

La biodégradation serait considérée comme source de transformation de précurseurs PFAS en acides perfluoroalkyles dans l'eau traitée. Des traitements complémentaires aux traitements classiques comme l'adsorption sur résines échangeuses d'ions, la dégradation électrochimique et la nanofiltration sont des techniques montrant une bonne efficacité d'élimination des PFAS de l'eau (95–100 %). Néanmoins l'application à l'échelle industrielle est signalée comme un défi à cause des effets d'échelle, des limitations de transfert de masse et la gestion des sous-produits et déchets comme les concentrats de membrane.

---

36 Lenka SP, Kah M, Padhye LP, A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoro-alkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants, *Wat. Res.*, 2021, 199, 117187.

Les auteurs proposent des optimisations de filières en combinant de la nanofiltration suivie de l'adsorption sur « biochar » et/ou charbon actif sous réserve d'une validation technico-économique.

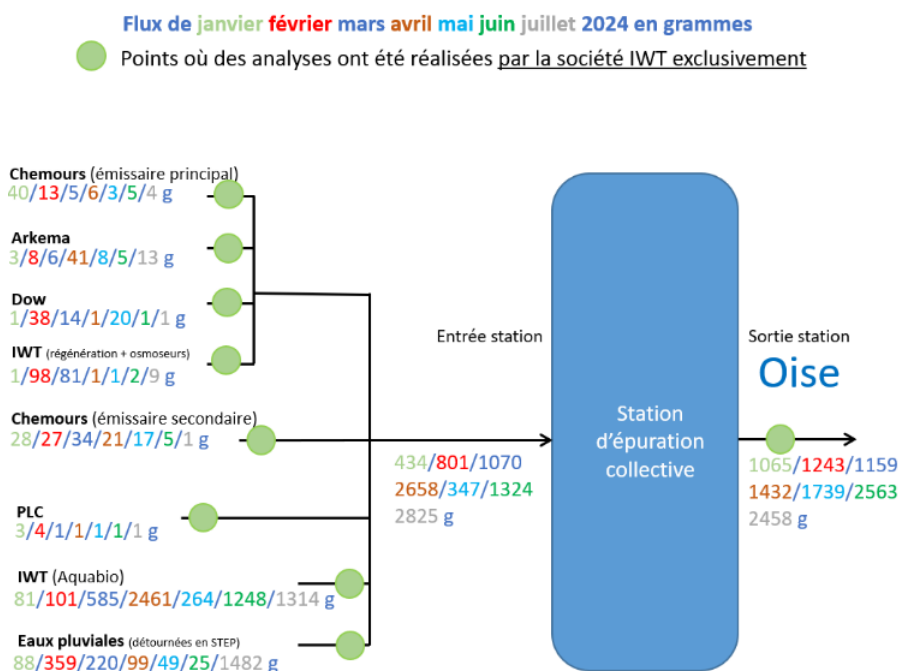


Figure 10 : Bilan 2024 des émissions de certains PFAS dans les rejets aqueux de la plateforme chimique de Villers-Saint-Paul, certains émissaires étant traités avant rejet par adsorption sur du charbon actif<sup>37</sup>.

37 <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?La-plateforme-chimique-de-Villers-Saint-Paul>

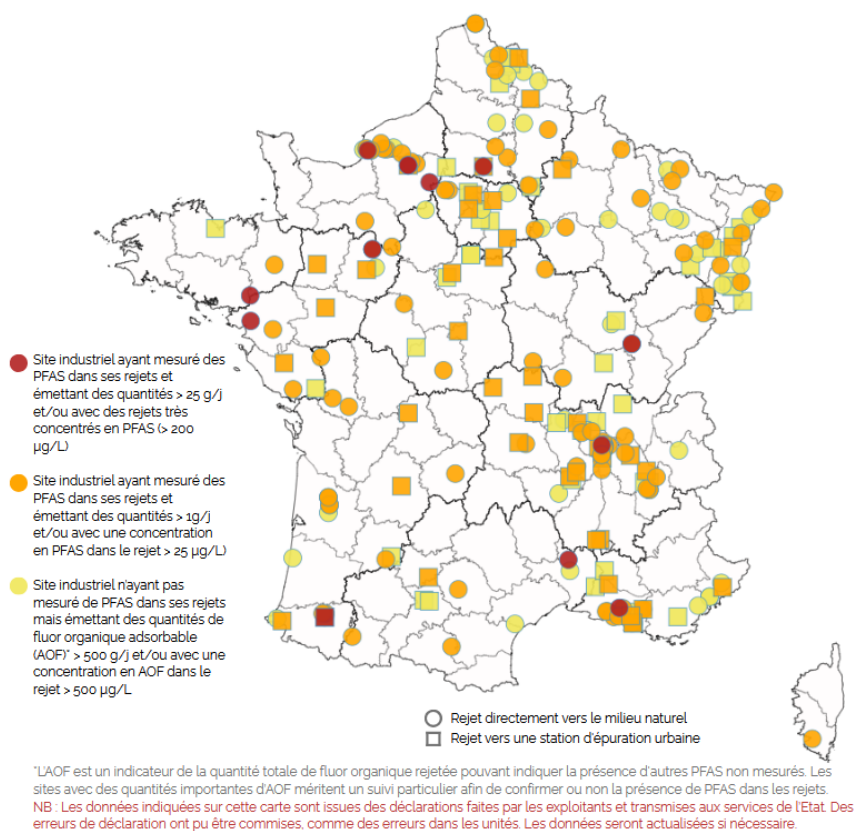


Figure 11 : Exemple de cartographie de sites classés « ICPE » pouvant diffuser des rejets liquides de PFAS vers l'environnement réalisée sur la base de données des Directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement et publiée par l'association Génération future<sup>38</sup>.

## DANS LES SOLS

Le transport et l'accumulation dans les sols est dépendant des propriétés des molécules ainsi que des caractéristiques géochimiques des sols et notamment leur taux d'humidité et de matières organiques. Selon l'Ineris, la sorption des PFAS dans les sols est corrélée positivement à la longueur de la chaîne carbonée et inversement corrélée au pH et les mécanismes

38 <https://www.generations-futures.fr/actualites/rejets-pfas-icpe/>

gouvernant l'intensité de la rétention et surtout les rôles relatifs des différents composants du sol, tels que le carbone organique, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et les argiles restent à comprendre<sup>39</sup>.

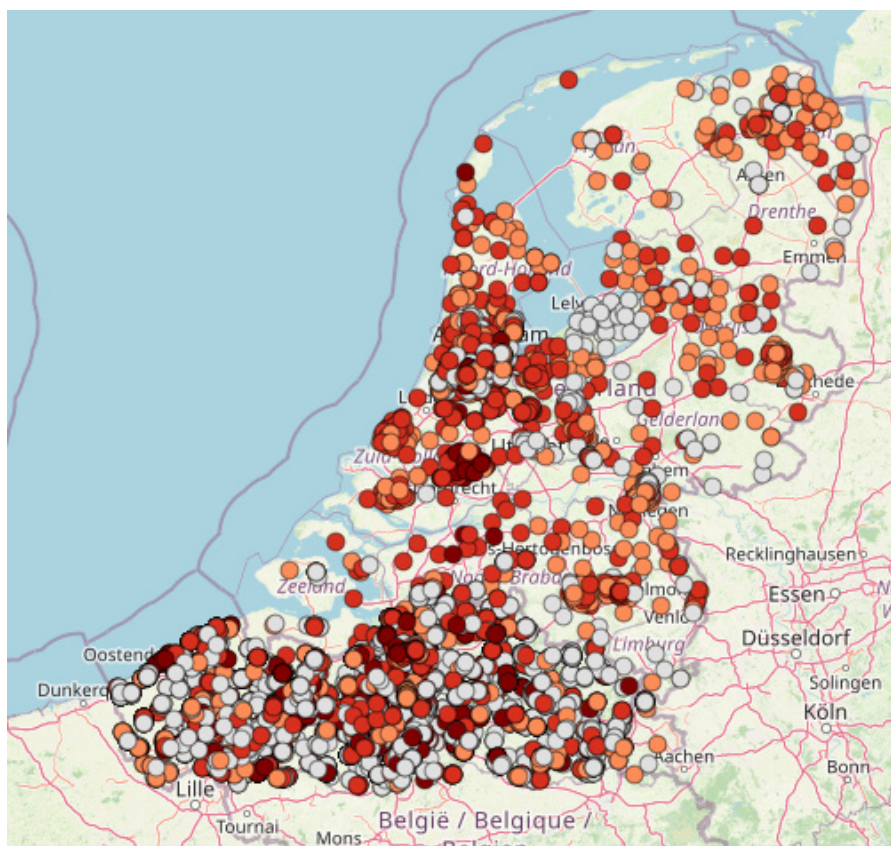


Figure 12: Exemple de données de contamination de sols par des PFAS au Bénélux et aux Pays Bas<sup>40</sup>.

39 Ineris, Comportement des substances per et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les sols et les eaux souterraines, 2024, Rapport 213870 - 2789035 - v1.0.

<https://www.ineris.fr/fr/comportement-substances-polyfluoroalkylees-pfas-sols-eaux-souterraines>

40 PFAS Data Hub CNRS. <https://pdh.cnrs.fr/fr/map/>

## DANS L'AIR EXTÉRIEUR

La diffusion des molécules PFAS se produit dans l'air sous forme gazeuse pour les plus volatiles et par adsorption sur des particules transportées avec retombées au sol sous forme de dépôts secs et humides. Les fluorotélomères volatils (ex: alcools fluorotélomères (FTOHs)) sont facilement transportés dans l'atmosphère et, une fois oxydés deviennent une source secondaire de dépôts atmosphériques de PFAS.

Les données de contamination sont beaucoup moins nombreuses que pour les eaux. La figure 13 illustre un exemple de données obtenues dans l'air de sites industriels et de sites péri-urbains de plusieurs pays.

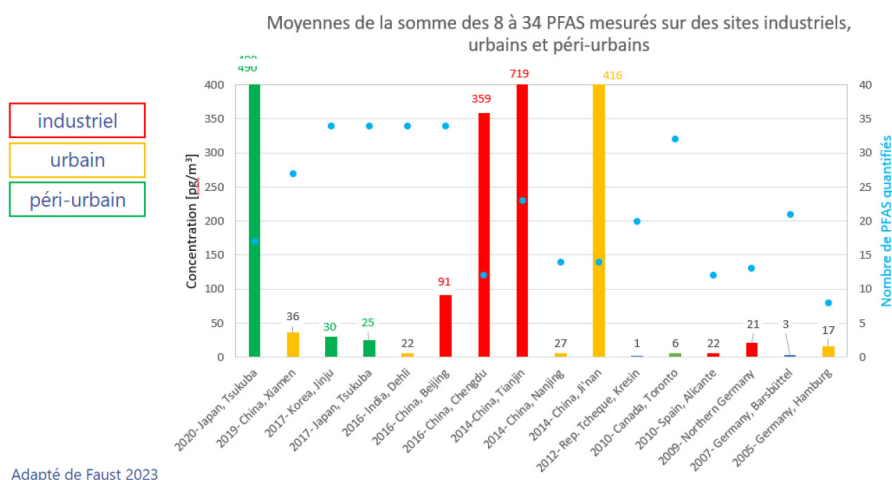


Figure 13: Concentrations en PFAS (parmi les molécules analysées) dans l'air sur des zones industrielles et péri-urbaines de différents pays<sup>41</sup>.

Les PFAS solubles dans l'eau et à courte chaîne migrent au cœur des particules d'aérosol aqueux et l'eau de pluie peut transporter également de

41 D'après Faust in *Atmo Auvergne*, Rhône-Alpes, 2024

[https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/medias/documents/2024-06/Note\\_Biblio\\_PFAS-AtmoAura\\_042024.pdf](https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/medias/documents/2024-06/Note_Biblio_PFAS-AtmoAura_042024.pdf)

faibles quantités de certains PFAS comme illustré dans l'étude de Berthou *et al.*<sup>42</sup>, montrant les plus importants des acides perfluorocarboxyliques (PFCA): l'acide perfluorononanoïque, l'acide perfluoroundecanoïque et l'acide perfluorohexanoïque.

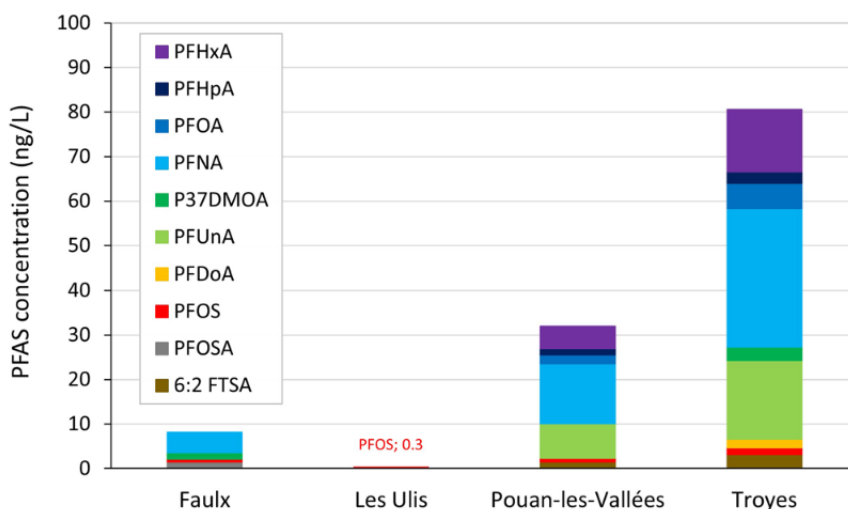


Figure 14: Quantification de certains PFAS dans des eaux de pluie sur des sites de collecte en France <sup>42</sup>.

Il serait indispensable d'identifier les principales sources de pollutions pour mieux agir dans la réduction des émissions. Toutefois, cette identification est excessivement complexe compte tenu des différents usages et du devenir des molécules une fois présentes dans l'environnement, comme le souligne par exemple le Bureau de recherche géologique et minières (BRGM) (Figure 15).

42 Berthou M, Gérard V, Pélingre M, Bagard A, Batteux TL, Losfeld G, Is it raining PFAS in France? An analysis of 52 PFAS at nanogram per liter levels in French rainwaters during autumn season, J Environ Qual. 2024 Jan-Feb;53(1):123-132. doi: 10.1002/jeq2.20525. Epub 2023 Nov 28. PMID: 37888768. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37888768/>

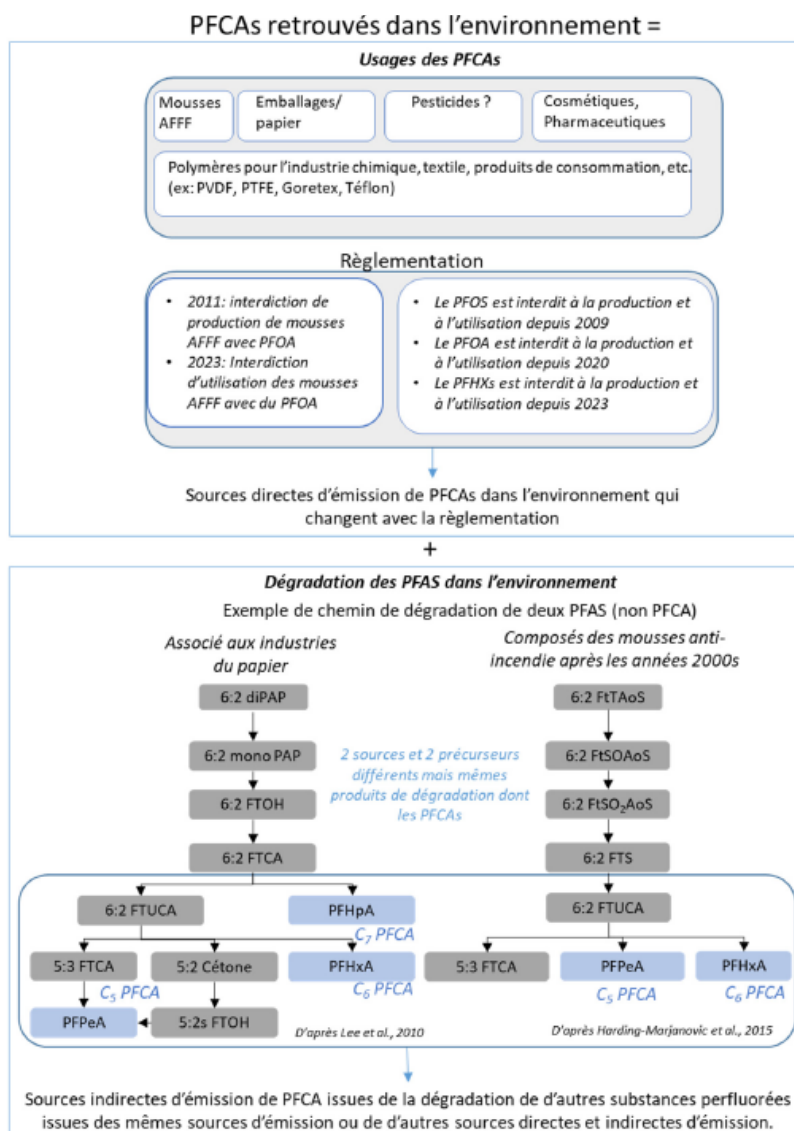


Figure 15: Illustration de la complexité pour identifier les sources d'émissions de PFAS: exemple des PFCA's (acides Perfluoroalkyl carboxyliques)<sup>43</sup>.

43 Cavelan A, Togola A, État des lieux des sources directes d'émissions en PFAS, 2024, Rapport BRGM RP-73452-FR.  
<https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/etat-des-lieux-des-sources-directes-demissions-pfas>

Des progrès significatifs récents ont été accomplis en France dans la connaissance des niveaux de contamination des eaux superficielles et souterraines. Néanmoins, le plan d'actions interministériel sur les PFAS insiste à juste titre sur l'importance de développer très fortement la connaissance de la pollution par les PFAS dans l'air extérieur, les airs intérieurs (travail, domiciles, loisirs), les sols et les aliments ainsi que le niveau d'imprégnation des populations. Ceci d'autant plus qu'au niveau international, la pollution de l'air intérieur et des poussières dans les logements (air, poussières) commence à être décrite<sup>44,45</sup>.

### DANS LES ALIMENTS

Selon l'agence européenne EFSA, l'une des principales façons dont les PFAS contaminent les aliments réside dans leur accumulation progressive dans l'eau, les poissons, les mollusques, les plantes et les autres animaux. En outre, ils peuvent migrer à partir d'équipements de transformation des aliments et d'emballages alimentaires. Toutefois, l'agence estime que « cette contribution à l'exposition humaine est faible par rapport aux autres sources ». Les enfants en bas âge et les enfants plus âgés sont les plus exposés en raison de leur plus grande consommation d'aliments par kilogramme de masse corporelle. Les molécules qui s'accumulent dans l'organisme au fil du temps et qui sont transférés au lait maternel, font que des taux élevés chez les mères peuvent entraîner une exposition du nourrisson. Une politique sanitaire efficace en santé périnatale implique donc une prise en compte générale des pollutions.

Les PFAS sont transférés du sol aux plantes. En général, les taux de transfert sont plus élevés pour les PFAS à chaîne courte. Les taux de transfert diminuent depuis les racines jusqu'aux feuilles et aux fruits, en raison des barrières naturelles à l'intérieur des plantes. Néanmoins, des PFAS ont été détectés dans les fruits. Ce transfert vers les matières dérivées des plantes est important pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux,

---

44 Atmospheric fate of poly- and perfluorinated alkyl substances (PFAS): Day-Night patterns of air concentrations in summer in Zurich, Switzerland, *Environm. Poll.*, 169, 196-203.

45 Harrad S, Wemken N, Drage DS *et al.*, Perfluoroalkyl substances in drinking water, indoor air and dust from Ireland: implication for human exposure, *Environm. Sci. Technol.*, 2019, 53, 13449-13457.

y compris la paille. Chez les animaux producteurs d'aliments, les PFAS passent des aliments pour animaux aux aliments dérivés des animaux tels que le lait, les œufs et la viande, avec des différences évidentes entre les espèces et le type de PFAS. Cela vaut également pour l'ingestion du sol par les animaux d'élevage en quête de nourriture<sup>46</sup>. Ces auteurs calculent que la somme des quatre molécules PFOA, PFNA, PFHxS et PFOS représente en Europe, 46% des apports par les aliments, PFBA 16% et PFHxA 15%. Pour les 4 principaux, les apports sont majoritairement liés à la viande, au poisson, aux fruits et produits issus de fruits, et aux œufs et produits dérivés.

L'Anses précise que depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2023, quatre PFAS sont réglementés dans certaines denrées alimentaires d'origine animale (poissons, mollusques, crustacés, œufs, viande et abats d'animaux de boucherie, de volailles et de gibier) dans le cadre de la mise sur le marché de ces denrées ([règlement \(UE\) 2023/915](#)) : en cas de non-conformité, les produits ne peuvent être proposés à la vente. En revanche, il n'existe pas de valeurs limites pour les denrées autoproduites par des particuliers<sup>47</sup>.

De plus, la Commission européenne a émis des recommandations (([UE](#)) 2022/1431 et ([UE](#)) 2022/1428) pour que les États membres surveillent la teneur en plusieurs PFAS dans les denrées alimentaires au cours des années 2022 à 2025.

**Éléments clés :** *De très nombreuses études ont révélé la présence ubiquitaire de certains PFAS, parmi les plus solubles dans l'eau, dans les graisses et les plus volatils, sur tous les continents et dans tous les milieux : air, eaux, sols, poussières dans les habitats et également dans les aliments. Les transferts se font à partir de sources ponctuelles de production et d'utilisation industrielles, de traitement des déchets solide et liquides, de sites d'usage de mousses ignifugeantes... La diffusion se fait aussi de manière plus diffuse via l'usage de certains pesticides, de la présence dans la constitution ou le revêtement de nombreux produits d'usage courant.*

46 EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food, *EFSA Journal*, 2020.  
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>

47 <https://www.anses.fr/fr/content/pfas-substances-chimiques-persistantes>

*Sont impactées les eaux de surface et souterraines, les eaux côtières, des eaux de pluie et la connaissance est encore imparfaite pour les sols, l'air extérieur et les espaces intérieurs avec transfert vers des aliments.*

*Les niveaux de concentration et la liste des molécules prioritaires sont assez bien documentés et, compte tenu de leur persistance, des molécules interdites d'usage sont encore largement détectées dans l'environnement.*

*Il reste indispensable de mesurer avec précision les différentes sources d'exposition des populations pour guider les voies d'action prioritaires de réduction de ces expositions.*

### **3.2. DES RISQUES TOXIQUES AVÉRÉS (ÉCOTOXIQUES, SANTÉ HUMAINE)**

La présence ubiquitaire des PFAS sur toute la planète, combinée à leurs propriétés de pénétration et d'accumulation dans les organismes biologiques, conduit à des niveaux d'expositions induisant des effets toxiques.

#### **L'importance de caractériser les dangers et les risques**

Un danger chimique (molécule, métal, ion, mélange...), physique (chaleur, rayonnement ionisant...) ou biologique (bactérie, virus...) peut induire un risque (probabilité d'induire un effet indésirable) sur un organisme exposé à ce danger. La quantification des risques est alors conditionnée notamment par les caractéristiques de persistance dans l'environnement, de bioaccumulation dans les cellules et organismes vivants et de toxicité (Indice PBT) des dangers. Ainsi, des polluants très persistants, capables de s'accumuler par exemple dans la masse graisseuse et présentant des effets biologiques devenant toxiques, constituent des priorités majeures dans le cadre de la protection de la santé publique et de l'environnement.

Le risque est donc dépendant de la nature de la molécule et du niveau d'exposition et certains PFAS sont largement présents dans tous les environnements, dans des aliments et des objets du quotidien, ce qui conduit à une exposition permanente au cours de la vie.

La toxicité d'une famille de produits peut être très importante pour un type d'organisme sans l'être pour d'autres. Par exemple, les antibiotiques

sont très toxiques sur des bactéries mais peu sur les mammifères, mais l'abus d'antibiotiques génère des bactéries résistantes posant de graves problèmes d'infection sur les mammifères.

La persistance et la bioaccumulation peuvent conduire, au cours du temps, à des effets toxiques en raison de l'augmentation progressive des concentrations dans un organisme, alors que les niveaux d'exposition journaliers sont très faibles.

Tous ces éléments complexes, indispensables pour orienter les décisions de gestion, exigent une évaluation quantitative des risques sanitaires élaborée par des expertises collectives indépendantes disposant de suffisamment de données d'évaluation des effets biologiques et des expositions. Une telle évaluation des risques relatifs, qui peuvent être très différents selon les divers types de PFAS et leurs dérivés, est donc fondamentale.

En France, cette question, en ce qui concerne la santé humaine, relève de la compétence de l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses)<sup>48</sup>. Mais il importe également de réaliser un approfondissement de l'évaluation des risques pour l'environnement.

Les connaissances sur les effets toxiques de nombreux perfluorés sont encore faibles et les effets constatés pour une molécule ne se transposent pas nécessairement à d'autres PFAS. Ceci complique encore l'analyse des risques pour les mélanges de molécules.

Il est donc indispensable de disposer de données publiques plus complètes afin d'acquérir une vision plus précise de la situation nationale au regard des grands enjeux industriels liés à la restriction d'usage des PFAS.

#### **DES EFFETS INDÉSIRABLES SUR LES ORGANISMES**

Des PFAS ont été reconnus à forte préoccupation sanitaire par l'OCDE dès 2013, qui appelait déjà à un renforcement des restrictions d'usage,

---

48 Anses, PFAS : des substances chimiques très persistantes, 2025.  
<https://www.anses.fr/fr/content/pfas-substances-chimiques-persistantes>

car les réglementations spécifiques sur les PFOA et PFOS étaient jugées insuffisantes. L'OCDE pointait les risques de cancers, de troubles de la reproduction, de dégradation du système immunitaire, même à très faibles concentrations<sup>49</sup>.

L'agence américaine ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) résume, en 2021, des éléments de connaissance sur la toxicité des PFAS<sup>50</sup>. Elle précise que les molécules les plus étudiées sont les PFOS et PFOA et que la comparaison de la toxicité entre les divers PFAS est complexe du fait des différences de demi-vie d'élimination dans les organismes, du manque de données sur les mécanismes d'action, des différences de réactions entre espèces et des différences d'évaluation entre les études épidémiologiques et les essais en laboratoire. La demi-vie de composés est beaucoup plus courte chez certains animaux que chez l'humain, et les mécanismes de toxicité ne semblent pas être directement transposables pour tous les PFAS (Tableau 3).

Tableau 3: Illustration de la diversité des temps de demi-vie d'élimination de certains PFAS pour divers organismes mammifères rendant complexe l'extrapolation des données animales à l'organisme humain<sup>50</sup>.

|       | Humains        | Primates          | Rats                                                       | Souris            |
|-------|----------------|-------------------|------------------------------------------------------------|-------------------|
| PFOA  | 2,1 – 10,1 ans | 20,1 – 32,6 jours | Mâles : 44 – 322 heures<br>Femelles : 1,9 – 16,2 heures    | -                 |
| PFOS  | 3,3 – 27 ans   | 110 – 170 jours   | 7,4 – 93,7 jours                                           | 30,4 – 42,8 jours |
| PFHxS | 4,7 – 35 ans   | 87 – 141 jours    | Mâles : 15,9 – 28,6 jours<br>Femelles : 33,6 – 58,6 heures | 24,8 – 26,8 jours |
| PFNA  | 2,5 – 4,3 ans  | -                 | Mâles : 29,5 – 47 jours<br>Femelles : 33,6 – 58,6 heures   | 25,8 – 68,9 jours |
| PFBS  | 28 jours       | 8 – 95,2 heures   | 2,1 – 7,4 heures                                           | -                 |
| PFBA  | 72 – 81 heures | 40,3 – 41 heures  | 1 – 9,22 heures                                            | 2,8 – 13,3 heures |

49 OECD, OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs), 2013, Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD.

[https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/02/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals\\_da448522/0bc75123-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/02/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals_da448522/0bc75123-en.pdf)

50 ATSDR, Toxicological Profile for Perfluoroalkyls, 2021.

<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp200.pdf>

Les mécanismes d'action ne sont pas tous élucidés mais l'action sur le récepteur cellulaire activé par les proliférateurs de peroxysomes- $\alpha$  (PPAR $\alpha$ ) joue un rôle significatif.

Les associations les plus fréquemment décrites dans les études sur des animaux sont: hépatotoxicité, immunotoxicité (notamment la diminution de la production d'anticorps en réponse à la vaccination) et perturbations de la reproduction et du développement – dont la diminution de la masse corporelle à la naissance et l'altération du développement osseux<sup>51</sup>. L'extrapolation des résultats d'études animales vers les humains doit se faire avec prudence. En effet, les variations interspèces concernant la toxicocinétique et la toxicodynamique sont considérables pour les PFAS étudiées.

De nombreuses études ont évalué des impacts sur les écosystèmes et notamment les impacts sur les vers de terre, les reptiles, les oiseaux, les amphibiens ou les poissons<sup>52</sup>.

Pour évaluer le risque il importe de savoir si les populations animales ou humaines sont exposées à ces dangers et si les organismes en sont imprégnés. De premières études d'imprégnation ont été réalisées sur les populations et en particulier en France via l'étude ESTEBAN. Le PFOA et le PFOS, sont apparus comme les contributeurs les plus importants avec des niveaux d'imprégnation quantifiés à 100 % aussi bien chez les enfants que chez les adultes. Chez les adultes, des différences de niveaux d'imprégnation ont été observées selon le sexe, l'âge, l'indice de masse corporelle, la consommation de poissons et des produits de la mer, de légumes, l'autoconsommation d'œufs et de lait, l'utilisation des produits ou matériaux pendant les travaux de loisirs ou de bricolage. Le tableau 4 illustre les résultats de cette étude et la comparaison avec des données obtenues dans plusieurs autre pays.

---

51 ATSDR, Toxicological profile for perfluoroalkyls, 2021.  
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp200.pdf>

52 Ankley GT, Cureton P, Hoke RA *et al.*, Assessing the Ecological Risks of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Current State-of-the Science and a Proposed Path Forward, *Environ Toxicol Chem*, 2021, 40: 564-605. <https://doi.org/10.1002/etc.4869>

Tableau 4: Comparaison des concentrations sanguines moyennes en PFOA et PFOS (µg/L) observées chez les adultes en France et comparaison avec d'autres pays<sup>53</sup>.  
La notion de « P 95 » indique que 5 % de la population étudiée présentent des concentrations supérieures ou égales à la valeur indiquée.

| Pays                  | Année     | Population | Matrice | Moyenne géométrique µg/L | P 95* µg/L |
|-----------------------|-----------|------------|---------|--------------------------|------------|
| <b>PFOA</b>           |           |            |         |                          |            |
| France - Estéban      | 2014-2016 | 18-74 ans  | Sérum   | 2,08                     | 5,26       |
| Espagne - BioAmbient  | 2009-2010 | 18-65 ans  | Sérum   | 1,99                     | 5,48       |
| Canada ECMS (Cycle 2) | 2009-2011 | 12-79 ans  | Plasma  | 2,30                     | 5,30       |
| États-Unis, Nhanes    | 2015-2016 | ≥20 ans    | Sérum   | 1,60                     | 4,27       |
| République Tchèque    | 2015      | 18-65 ans  | Sérum   | 0,72                     | ND*        |
| Allemagne Site A      | 2015      | 18-67 ans  | Plasma  | 26,90                    | 85,80      |
| Allemagne Site B      | 2015      | 18-67 ans  | Plasma  | 2,80                     | 8,50       |
| Allemagne Site C      | 2016      | 18-67 ans  | Plasma  | 1,20                     | 2,40       |
| Corée du Sud          | 2009-2010 | 18-69 ans  | Sérum   | 2,85                     | 8,82       |
| <b>PFOS</b>           |           |            |         |                          |            |
| France -Estéban       | 2014-2016 | 18-74 ans  | Sérum   | 4,03                     | 13,54      |
| Espagne - BioAmbient  | 2009-2010 | 18-65 ans  | Sérum   | 7,67                     | 19,33      |
| Canada ECMS (Cycle 2) | 2009-2011 | 12-79 ans  | Plasma  | 6,50                     | 19,00      |
| États-Unis, Nhanes    | 2015-2016 | ≥20 ans    | Sérum   | 5,02                     | 19,10      |
| République Tchèque    | 2015      | 18-65 ans  | Sérum   | 2,29                     | ND*        |
| Allemagne Site A      | 2015      | 18-67 ans  | Plasma  | 3,30                     | 13,50      |
| Allemagne Site B      | 2015      | 18-67 ans  | Plasma  | 2,70                     | 8,90       |
| Allemagne Site C      | 2016      | 18-67 ans  | Plasma  | 2,60                     | 6,40       |

53 Santé Publique France, Imprégnation de la population française par les composés perfluorés : Programme national de biosurveillance, 2019, Esteban 2014-2016.  
<https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/225178/2482073?version=1>

Les études épidémiologiques chez des populations fortement exposées suggèrent les effets suivants chez l'humain :

- l'hypertension induite et la pré-éclampsie durant la grossesse (PFOA, PFOS);
- l'augmentation des taux d'enzymes hépatiques circulants, particulièrement l'alanine aminotransférase (ALT), et une diminution du taux de bilirubine sérique (PFOA, PFOS, PFHxS);
- l'augmentation des lipides sériques, particulièrement le cholestérol listotal et les lipoprotéines de faible densité (LDL) (PFOA, PFOS, PFNA, PFDA);
- une diminution de la réponse immunitaire aux vaccins majoritairement chez les enfants (PFOA, PFOS, PFHxS, PFDA);
- une faible réduction de la masse corporelle des nouveau-nés (PFOA, PFOS):
  - le PFOS (acide perfluorooctanesulfonique) affecte les fonctions du foie, des reins, de la thyroïde, la fécondité et liens avec des cancers,
  - le PFOA (acide perfluorooctanoïque) est associé à des cancers du rein et des testicules, des troubles thyroïdiens, hypertension de grossesse, hyper cholestérolémie,
  - le PFHxS (acide perfluorohexanesulfonique) influence le système nerveux, le développement cérébral, perturbateur endocrinien.

Ces mêmes molécules, parmi celles les plus fréquemment retrouvées dans l'environnement, diffusent vers le fœtus par le sang du cordon et chez l'enfant par le lait maternel. En décembre 2023, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le PFOA comme « cancérogène pour les humains » (groupe 1) et le PFOS comme « peut-être cancérogène (parfois appelé cancérogène possible) pour les humains » (groupe 2B).

La figure 16 illustre des éléments connus de la toxicité humaine des PFAS listés ci-dessus.

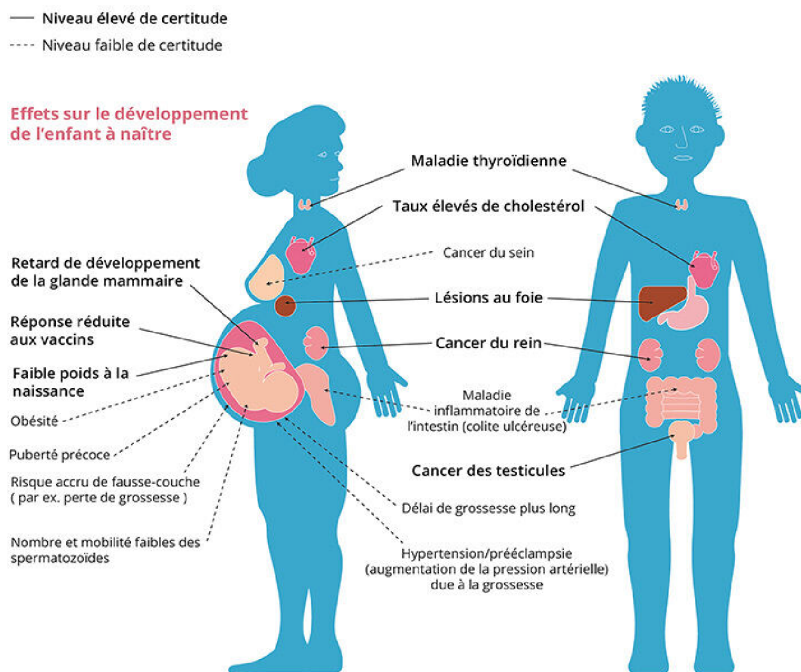


Figure 16: Synthèse des éléments connus ou suspectés sur la toxicité pour l'humain des PFAS ayant fait l'objet d'études toxicologiques abouties<sup>54</sup>.

Les petites molécules sont les plus préoccupantes à l'heure actuelle :

- molécules très nombreuses et nocives ;
- en particulier, l'acide trifluoroacétique (TFA), l'acide perfluorooctanesulfonique (PFOS), l'acide perfluorooctanoïque (PFOA), l'acide perfluorohexanesulfonique (PFHxS) et l'acide perfluorononanoïque (PFNA), particulièrement

54 Agence européenne de l'environnement, 2015.  
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emerging-chemical-risks-in-europe>

identifiés comme nocifs et à bannir de toute utilisation pour la production de polymères fluorés, et à surveiller lors de la vie du polymère (utilisation et recyclage);

- d'autres tensioactifs fluorés ont été développés (PFOSA (perfluorooctane-sulfonamide), PFHpA (acide perfluoroheptanoïque), PFDA (acide perfluorodecanoïque), PFBS (acide perfluorobutane sulfonique), HFBA (acide heptafluorobutyrique) comme possible alternative, mais les données toxicologiques sont moins connues. Ils sont donc très préoccupants car très similaires en structure et propriété aux produits les plus nocifs.

L'exemple de l'acide trifluoroacétique (TFA) et de ses sels, qui constituent des petites molécules très largement polluantes de l'environnement, illustrent l'examen nécessaire des effets toxiques selon les espèces concernées. Les concentrations sans effets nocifs observés sont citées proches de 5 grammes par kilogrammes de masse corporelle chez la souris et de 200 mg/kg chez le rat mais toxiques à des concentrations beaucoup plus faibles sur des plantes<sup>55</sup>. Des analyses de risques concluent à une large marge d'exposition par rapport aux effets toxiques pour les mammifères par rapport aux concentrations connues dans l'environnement, mais une marge très faible pour les plantes en particulier via l'eau de pluie contaminée, et une marge moyenne pour des microalgues<sup>56</sup>.

Les fluoropolymères constituant des matériaux solides, même s'ils entrent dans la classification PFAS de l'OCDE, présentent des propriétés toxicologiques très différentes de celles des petites molécules, et sont considérés comme inertes. Il importe toutefois que leur fabrication ne diffuse pas de molécules toxiques (fluorées ou pas) vers l'environnement, et donne accès à des produits purs, utilisés purs et dans des conditions n'entraînant pas une décomposition. Il est important aussi que leur utilisation ne génère pas de microplastiques et qu'ils soient traités correctement en fin de vie. Le comportement à très long terme de ces

---

55 Garavagno MdI.A, Holland R, Khan MAH. *et al.*, Trifluoroacetic Acid: Toxicity, Sources, Sinks and Future Prospects, *Sustainability*, 2024, 16, 2382.

56 Solomona KR, Velders GJM, Wilson SR *et al.*, Sources, fates, toxicity, and risks of trifluoroacetic acid and its salts: Relevance to substances regulated under the Montreal and Kyoto Protocols, *J Toxicol. Environm. Health*, 2016, Part B, 19, 7, 289–304.

polymères et l'impact long terme de leur ingestion ou de leur interaction avec les systèmes biologiques ou les écosystèmes reste à préciser.

**Éléments clés:** Certains PFAS, parmi ceux qui sont présents dans l'environnement, imprègnent les tissus biologiques induisant des effets indésirables sur les organismes (effets cancérigènes, perturbateurs endocriniens, fonction hépatique...). Selon les structures chimiques, la bioaccumulation, le temps de demi-vie dans les organismes et les effets toxiques et les concentrations induisant des effets sont différents.

## Chapitre 4

# LA RÉPONSE DES ÉTATS : VERS UNE INTERDICTION TOTALE OU SÉLECTIVE ?

### L'ACTION CONTRE LES POLLUTIONS CHIMIQUES EST DÉJÀ ANCIENNE ET INTERNATIONALE

**7 février 1997 :** Décision 19/13 C du conseil d'administration du programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) relative à l'action internationale à mener pour protéger la santé humaine et l'environnement en adoptant des mesures visant à réduire, voire éliminer, les émissions et rejets de polluants organiques persistants (POPs).

**22 mai 2001 :** La Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants met en place des processus visant à réduire la production et l'usage de tels produits. 152 signataires et 186 parties dont l'Union Européenne et ses États membres.

**29 avril 2004 :** Règlement (CE) n°850/2004 concernant les POPs. Ce règlement transpose dans le droit de l'UE, la Convention de Stockholm

**Juin 2007 :** entrée en vigueur du Règlement CE n°1907/2006 (REACH) qui vise à « recenser, évaluer et contrôler » l'ensemble des substances chimiques qui sont fabriquées, importées et mises sur le marché en Europe au sein de l'espace économique européen. Les industriels fabricant ou important des substances chimiques sont obligés de faire enregistrer leur molécule pour pouvoir accéder au marché (selon une liste de produits chimiques et de tonnages).

### Pour mémoire :

- les règlements européens entrent directement en vigueur dans les États membres (EM).
- les directives européennes nécessitent, elles, une transposition de la part des EM avec adoption d'un acte législatif précisant les mesures nationales permettant de réaliser les objectifs fixés par la directive. Ces mesures doivent être transmises par les autorités nationales à la CE. La Cour de justice de l'UE peut prendre des mesures pour sanctionner la non-transposition d'une directive.

**À partir de 2009, l'action s'intensifie, et se précise :** Trois PFAS sont interdits ou restreints au niveau international avec des dérogations limitées à certaines applications : les PFOS en 2009, les PFOA en 2020 et les PFHxS en 2022.

### 4.1. LA SITUATION EUROPÉENNE

Le 20 juin 2019 est publié le règlement (UE) 2019/1021 concernant les POPs (Règlement POP) qui vise à mettre en œuvre des dispositions pour réduire voir interdire les molécules organiques qui possèdent l'une des quatre propriétés :

- persistantes,
- bioaccumulables,
- toxiques,
- mobiles.

Le 13 janvier 2023 est déposée une **proposition** de restriction des PFAS auprès de l'ECHA par cinq pays européens (Pays-Bas, l'Allemagne, la Norvège, la Suède et le Danemark). La restriction d'usage vise l'ensemble de la famille des PFAS, basée sur la définition de l'OCDE qui inclut notamment les fluoropolymères et les polymères à chaînes latérales fluorées.

Deux options de restriction différentes sont étudiées :

RO1: interdiction totale (avec une période de transition de 18 mois après vote avant l'entrée en vigueur des restrictions).

RO2: interdiction avec des périodes de transition/déroptions plus larges suivant le type d'usage et leurs alternatives :

- une période de transition de 18 mois avant l'entrée en vigueur des restrictions pour certains usages non essentiels ;
- une dérogation de 5 ans après la fin de la période de transition pour d'autres usages ;
- une dérogation de 12 ans après la fin de la période de transition pour d'autres usages (alternatives non existantes) ;
- une dérogation illimitée uniquement pour certaines utilisations spécifiques.

L'entrée en vigueur pourrait voir le jour aux alentours de 2026-2027.

L'Europe est la seule région à disposer d'une législation aussi contraignante que le règlement REACH. Toutefois, dans un contexte compliqué, la révision du règlement REACH, initialement prévue fin 2022, avait été reportée à 2024. Elle ne fait pas partie de l'agenda de l'Union pour 2025.

#### **DIFFICULTÉS DU PROCESSUS EUROPÉEN**

L'élaboration du dossier de restriction est initiée par grands types d'applications ce qui est pertinent pour permettre de travailler avec les filières industrielles concernées.

L'ECHA a lancé un appel à soumettre des commentaires et des preuves. Le dossier de restriction doit contenir de multiples informations sur les dangers et les risques, et les informations disponibles concernant les molécules de remplacement, et démontrer qu'une restriction représente la mesure de gestion des risques qui se trouve être la plus appropriée pour prévenir les risques recensés. Il doit également contenir une analyse

des impacts socio-économiques. Compte tenu du nombre de molécules et de leurs usages très nombreux, le dossier est extrêmement lourd et la procédure compliquée et longue.

#### EN PARALLÈLE, UNE RÉGLEMENTATION DANS LES PRODUITS FINIS

Le 7 décembre 2022 est publié le règlement (UE) 2022/2388 qui fixe des limites maximales de PFAS dans certains aliments d'origine animale (poissons, mollusques, crustacés, œufs, viande et abats d'animaux de boucherie, de volailles et de gibiers). Pour chaque produit, cinq limites maximales sont établies: quatre individuelles (PFOS, PFNA, PFOA, PFHxS) et une pour la somme de ces quatre PFAS.

Les produits dépassant les limites maximales en PFAS ne peuvent pas être vendus tels quels, mélangés à d'autres aliments ou utilisés comme ingrédients dans d'autres aliments

Le 16 décembre 2020 est publiée la nouvelle directive (UE) 2020/2184 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) qui stipule qu'à partir du 12 janvier 2026, les États membres devront satisfaire, dans les EDCH, à des limites de concentrations de PFAS de 100 ng/L pour la somme des PFAS les plus préoccupants et 500 ng/L pour la somme de tous les PFAS détectés.

Certains membres européens ont déjà intégré des mesures plus strictes pour la somme de 4 PFAS (PFOA, PFOS, PFNA et PFHXS) avec des valeurs limites de 2 ng/L ou 4 ng/L. En France, le Haut Conseil de la Santé Publique a également recommandé une limite complémentaire pour ces 4 PFAS les plus fréquemment détectés dans des ressources en eau servant à la production d'EDCH<sup>57</sup>.

**Conséquence:** *Par son côté imprévisible à court terme l'environnement législatif est aujourd'hui complexe pour les industries stratégiques, l'Europe et ses pays membres.*

---

57 HCSP, Gestion des risques sanitaires liés à la présence de composés PFAS dans les EDCH, 2024. [https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcsp20240709\\_gesdesrissanlislaprsdecompfadanle.pdf](https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcsp20240709_gesdesrissanlislaprsdecompfadanle.pdf)

## 4.2. FRANCE

Le plan d'action interministériel sur les PFAS 2023-2027 est composé de six axes de travail<sup>58</sup> :

- disposer de normes sur les rejets et les milieux pour guider l'action publique ;
- porter au niveau européen une interdiction large pour supprimer les risques liés à l'utilisation ou la mise sur le marché des PFAS ;
- améliorer la connaissance des rejets et de l'imprégnation des milieux, en particulier des milieux aquatiques, pour réduire l'exposition des populations ;
- réduire les émissions des industriels émetteurs de façon significative ;
- assurer la transparence sur les informations disponibles ;
- s'intégrer, à moyen terme dans le plan « micropolluants ».

### **DES DISPOSITIONS LÉGISLATIVES PORTANT RESTRICTIONS DES PFAS POUR CERTAINS TYPES D'USAGES**

La LOI n° 2025-188 du 27 février 2025 visant à protéger la population des risques liés aux substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées précise :

*« I. – Sont interdites, à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2026, la fabrication, l'importation, l'exportation et la mise sur le marché à titre onéreux ou gratuit de :*  
*Tout produit cosmétique contenant des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées ;*  
*Tout produit de fart contenant des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées ;*  
*Tout produit textile d'habillement, chaussures et agents imperméabilisants de produits textiles d'habillement et de chaussures destinés aux consommateurs contenant des substances perfluoroalkylées et*

---

58 [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/2024.04.05\\_Plan\\_PFAS.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/2024.04.05_Plan_PFAS.pdf)

*polyfluoroalkylées, à l'exception des textiles d'habillement et des chaussures qui sont conçus pour la protection et la sécurité des personnes, notamment dans l'accomplissement des missions de défense nationale ou de sécurité civile, et dont la liste est précisée par décret.*

*II. – Sont interdites, à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2030, la fabrication, l'importation, l'exportation et la mise sur le marché à titre onéreux ou gratuit de tout produit textile contenant des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées, à l'exception des produits textiles nécessaires à des utilisations essentielles, de ceux contribuant à l'exercice de la souveraineté nationale et pour lesquels il n'existe pas de solution de substitution et des textiles techniques à usage industriel, dont la liste est précisée par décret.*

*III (nouveau). – Les interdictions prévues aux I et II ne s'appliquent pas aux produits contenant des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées présentes en concentration inférieure ou égale à une valeur résiduelle définie par décret. »*

La toute nouvelle législation française devance donc les décisions européennes à venir sur ces filières considérées comme non stratégiques (à noter l'exception pour certains textiles pour lesquels les PFAS apportent des intérêts réels en matière de protection incendie). Elle englobe naturellement la fabrication et l'exportation mais aussi l'importation ce qui nécessite une mise en place de contrôles qualités adéquats. Un contrôle efficace de l'importation peut être un avantage commercial pour les marques françaises/européennes.

#### **4.3. LE GRAND INTERNATIONAL**

Expliquer et faire un point exhaustif sur les situations législatives et réglementaires au grand international n'est pas possible dans le cadre de ce rapport. Les pays cherchent tous à mettre sur pieds des restrictions et contrôles mais avec les mêmes difficultés que celles rencontrées au niveau européen.

On note ainsi des annonces qui ne sont pas forcément suivies par la mise en œuvre de textes précis.

Un certain consensus cependant évolue vers l'interdiction de l'usage de PFAS dans les produits pour lesquels soit des alternatives existent soit ils

ne sont pas indispensables, la définition du critère indispensable restant à définir. Les stratégies nationales s'influencent mutuellement et sont impactées par les publications sur le domaine des PFAS.

Quatre groupes de pays se détachent pour le nombre de publication sur le sujet :

- les États-Unis en premier ;
- la Chine, l'Australie et le Canada ;
- l'Europe et l'Amérique latine ;
- les autres régions.

Il est important de comprendre les évolutions réglementaires actuelles et d'anticiper celles à venir en raison de leurs impacts sur les importations et les exportations. La France peut ainsi se trouver en rupture d'approvisionnement sur certains composants ou dans l'impossibilité d'exporter. Il est donc de la responsabilité des industriels de suivre avec attention les évolutions réglementaires internationales<sup>59</sup>.

## ÉTATS-UNIS

La réglementation de plus de 30 États américains (Californie, New York, Washington...) interdit de manière large l'utilisation de PFAS en visant certains secteurs d'activité (textile, cosmétique, emballages alimentaires...). En avril 2024, l'USEPA<sup>60</sup> a publié deux réglementations : l'une visant à limiter six molécules PFAS dans l'eau destinée à la consommation

---

59 Spickler K, PFAS Regulations and Strategies for Compliance, 2024. [https://www.ul.com/sites/default/files/2024-10/PFAS\\_Regulations\\_and\\_Compliance\\_Strategies\\_White\\_Paper.pdf](https://www.ul.com/sites/default/files/2024-10/PFAS_Regulations_and_Compliance_Strategies_White_Paper.pdf)

60 L'USEPA est une agence indépendante du gouvernement des États-Unis, dont les activités sont cependant contrôlées par le Comité des sciences, de l'espace et des technologies de la Chambre des représentants des États-Unis. Créée sur proposition du président Nixon le 9 juillet 1970. Sa mission est de « protéger la santé humaine et de sauvegarder les éléments naturels — l'air, l'eau et la terre — essentiels à la vie. »  
<https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>

humaine (EDCH) à des concentrations inférieures à 4 ng/L dont le PFOA et le PFOS, l'autre caractérisant le PFOA et le PFOS, ainsi que leurs sels et isomères structurels, comme «substances dangereuses» en vertu de la loi américaine sur la responsabilité, l'indemnisation et la réponse environnementale globale (CERCLA).

L'USEPA a également proposé un règlement du *Clean Water Act* (CWA) sur les rejets de PFAS de certaines installations. Cette règle vise principalement les industries telles que les fabricants et les formulateurs de produits chimiques organiques, de plastiques et de fibres synthétiques, qui sont susceptibles de rejeter des PFAS dans leurs eaux usées.

Cette agence a de nouveau révisé les délais de déclaration pour les fabricants et importateurs de PFAS en vertu de l'article 8 (a) (7) de la loi sur le contrôle des substances toxiques (TSCA). En vertu de cette dernière règle, la période de déclaration ne débutera pas avant le 13 avril 2026, avec une date limite fixée au 13 octobre 2026 pour la plupart des entreprises. Pour les petites entreprises qui déclarent uniquement les importations d'articles, les six mois supplémentaires portent la date limite de déclaration au 13 avril 2027.

Longtemps, des États américains ont été à l'avant-garde de la réglementation des PFAS, notamment la Californie, le Connecticut, le Maine, le New Hampshire, le Michigan, le New Jersey et New York et ils devraient continuer à faire avancer la réglementation des PFAS. En outre, d'autres États peu actifs jusqu'à présent pourraient également commencer à réglementer les PFAS, face à l'inquiétude croissante du public s'ils sont confrontés à un manque d'orientation fédérale.

## **CANADA**

Le ministère canadien de l'Environnement avait publié mi-2024 un avis exigeant que les parties concernées soumettent des données obligatoires sur 312 types de PFAS qui ont été produits, importés ou utilisés dans des produits dépassant certains seuils durant l'année 2023, d'ici le 29 janvier 2025.

Les entreprises éligibles doivent fournir des informations détaillées raisonnablement accessibles concernant les installations et les quantités liées à la fabrication, à l'importation ou à l'utilisation des PFAS listés. Les soumissionnaires disposaient d'environ six mois pour fournir ces informations, avec une date limite de déclaration fixée au 29 janvier 2025. Ils pouvaient demander un délai supplémentaire, mais devaient le faire au moins cinq jours ouvrables avant la date limite de janvier<sup>61</sup>. À noter que la proposition de réglementation à l'étude exclue les polymères considérés comme peu préoccupants.

### AUSTRALIE

En 2023, le ministère australien du changement climatique, de l'énergie, de l'environnement et de l'eau a lancé une consultation sur les modifications proposées à la norme de gestion environnementale des produits chimiques industriels (*Industrial Chemicals Environmental Management Standard – IChEMS*).

La consultation visait à recueillir les observations du public sur l'inscription d'un petit nombre de produits chimiques, notamment le PFOA, le PFOS et le PFHxS, ainsi que leurs sels et leurs précurseurs chimiques. Il a été proposé de les inscrire au tableau 7 du registre IChEMS en raison de leur probabilité d'impact négatif sur l'environnement et leur caractéristique de POP. La date d'entrée en vigueur est le 1<sup>er</sup> juillet 2025, afin de donner aux parties concernées le temps de se préparer aux restrictions à l'importation, à l'exportation, à la fabrication ou à l'utilisation dans la plupart des cas en Australie.

### NOUVELLE-ZÉLANDE

La Nouvelle-Zélande réglemente le PFOA et le PFOS en vertu de la loi de 1996 sur les substances dangereuses et les nouveaux organismes (*Hazardous Substances and New Organisms Act 1996 – HSNO*). Cette loi a été mise à jour en 2020 pour tenir compte des modifications apportées à la Convention de Stockholm et ajouter le PFOA, ses sels et les composés apparentés aux POP.

---

61 <https://gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2024-07-27/html/sup-eng.html>

La mise à jour de 2020 comprenait une exemption de cinq ans pour des mousses anti-incendie spécifiques.

Le PFOS est régi par la même loi depuis 2011, date à laquelle son utilisation a été interdite dans toutes les utilisations possibles, à la suite d'une disposition antérieure initiale concernant les mousses anti-incendie en 2006. L'interdiction de la production et de l'utilisation du PFHxS, de ses sels et de ses composés apparentés est effective depuis octobre 2023.

En janvier 2024, la Nouvelle-Zélande est également devenue le premier pays à interdire les PFAS dans les cosmétiques, avec effet au 31 décembre 2026. L'interdiction figure dans le *Cosmetics Products Group Standard*. La Nouvelle-Zélande possède des normes organisées par «Group Standard» qui peuvent permettre d'organiser les restrictions par filière. Les Cosmétiques sont donc la première filière à voir l'interdiction de tout PFAS en production et importation<sup>62</sup>.

## JAPON

Dans le cadre de la loi nationale sur le contrôle des substances chimiques (CSCL), le Japon dispose d'un arsenal législatif concernant la production, l'extraction, le raffinage ou l'utilisation estimés de substances chimiques en fonction de leur classification, la classe 1 étant la plus restrictive.

Les PFOS et PFHxS et ses apparentés sont déjà présents dans la classe 1.

Début 2024, le Japon a initié une consultation sur une proposition visant à inscrire le groupe de composés PFOA sur la liste des substances chimiques spécifiées de classe 1. Cette proposition interdirait leur fabrication et leur importation, ainsi que l'importation de produits en contenant et leur utilisation en dehors des utilisations essentielles approuvées. Les ministères responsables avaient annoncé des échéances prévues pour fin 2024 et en fonction des molécules.

---

62 <https://www.epa.govt.nz/hazardous-substances/substance-approvals-and-group-standards/>

## CHINE

La Chine a ajouté le PFOS et ses sels à la liste des produits chimiques strictement réglementés dans le pays dans le cadre du plan d'action pour la gouvernance des nouveaux polluants. Cette mise à jour a interdit la fabrication d'une liste de molécules à partir de mars 2023, leur utilisation dans les mousses anti-incendie à partir du 31 décembre 2023 et leur importation/exportation à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2024. Les PFOA et PFHxS sont également visés par la liste qui interdit leur production, leur transformation et leur utilisation, en plus d'autres mesures de contrôle.

## INDE

La demande de PTFE en Inde devrait croître, notamment pour industries automobile et aérospatiale, en moyenne de 7,2 %, passant de 6,55 kt en 2022 à 10,65 kt en 2029<sup>63</sup>.

Des études ont confirmé la contamination par des PFAS dans des eaux telles que le Gange et les ressources en eau de la ville de Chennai, ainsi que dans des échantillons de cheveux humains provenant de diverses villes. Un manque important de données persiste dans plusieurs États indiens.

Les données relatives à la production de PFAS, aux modes d'utilisation et aux pratiques de gestion des déchets en Inde sont rares ce qui empêche une évaluation holistique de la portée nationale du problème.

Bien qu'elle soit signataire de la Convention de Stockholm, l'Inde n'a pas encore mis en place de réglementation ou de programme de surveillance<sup>64,65</sup>.

---

63 MMR, India Polytetrafluoroethylene (PTFE) Market-Industry Analysis and Forecast (2023-2029), 2023. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/india-polytetrafluoroethylene-ptfe-market/42054/>

64 Koulini GV, Vinayagam V, Nambi IM, Krishna et al., Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in Indian environment: Prevalence, impacts and solutions, *J. Wat. Process Engin.*, 2024, 66, 105988.

65 Spickler K, PFAS Regulations and Strategies for Compliance, 2024. [https://www.ul.com/sites/default/files/2024-10/PFAS\\_Regulations\\_and\\_Compliance\\_Strategies\\_White\\_Paper.pdf](https://www.ul.com/sites/default/files/2024-10/PFAS_Regulations_and_Compliance_Strategies_White_Paper.pdf)

**Éléments clés :**

*Beaucoup de pays ont démarré la mise en place de réglementations restrictives visant à limiter les pollutions liées à la production ou à l'usage des PFAS ce qui a un impact sur leurs industries locales mais aussi sur leurs importations. Ces réglementations prennent en compte le niveau de toxicité du type de PFAS et la capacité à les substituer dans leurs usages. Les délais d'application des nouvelles réglementations peuvent varier d'un pays à l'autre en fonction des processus législatifs, réglementaires et administratifs mais une convergence est prévisible.*

*Il est de la responsabilité des industriels et de leurs filières de suivre avec attention les évolutions réglementaires internationales actuelles et d'anticiper celles à venir en raison de leurs impacts sur les importations et les exportations.*

*Compte tenu de la difficulté de contrôle des importations dans des produits complexes et stratégiques liés aux avions, voitures, smartphones..., ces évolutions réglementaires pourraient avoir un impact sur la souveraineté européenne et donc doivent faire l'objet d'attention des pouvoirs publics.*

## Chapitre 5

### **CONSIDÉRATIONS : ENJEUX TECHNOLOGIQUES ET INDUSTRIELS**

Les enjeux liés à la situation critique des PFAS ont déjà conduit à de nombreuses évolutions industrielles, réglementaires, économiques et une conscience sociétale majeure dans de très nombreux pays. Il s'agit donc d'un thème de grande actualité qui exige le suivi attentif et réactif aux nombreuses évolutions et la préparation efficiente et la plus rapide possible aux solutions. Ceci implique de développer, lorsqu'elles n'existent pas, des forces d'action tout au long de la chaîne de vie de la famille des PFAS et en priorité par ceux qui sont déjà évalués comme induisant des risques majeurs.

Différents pays prennent des mesures à un rythme différent visant des restrictions et interdictions qui auront un impact très important sur les importations et exportations ce qui rend fondamental de suivre attentivement les évolutions pour mieux anticiper sur :

- les impacts sur l'évolution des filières industrielles françaises ;
- le contrôle lors des importations en France avec des stratégies à développer et privilégier.

Les grandes difficultés mondiales liées aux productions, usages et fin de vie des PFAS se confrontent à l'ampleur du phénomène, aux budgets nécessaires pour le traiter et à l'impossibilité de dépolluer l'ensemble de l'environnement. Les actions à mener doivent donc s'inscrire dans une logique de hiérarchisation des cibles à éliminer en priorité (nature des cibles chimiques, principales sources d'émission, toxicité...), d'actions de formation et d'information sur les usages sans générer de risques, sur les moyens de produire les PFAS jugés indispensables sans polluer ou substituer par de produits sans risques et gérer la fin de vie par un

système de collecte performant et des unités de destruction sans polluants secondaires.

### **5.1. HIÉRARCHISER DES CIBLES PRIORITAIRES À RÉDUIRE/ÉLIMINER/ SUBSTITUER**

L'importance majeure de l'utilisation de PFAS dans des produits et des systèmes complexes justifie que des analyses très précises de type « bénéfiques/risques » soient établies avec rigueur et en urgence pour hiérarchiser les produits et situations à risques pour l'environnement et pour la santé publique. Il s'agit notamment d'identifier l'utilisation, ou la présence comme impuretés des molécules PFAS comportant un risque avéré, dans les voies d'exposition de l'environnement et des populations.

Cette hiérarchisation amène nécessairement à abandonner ou substituer des PFAS par d'autres molécules dont les propriétés sont reconnues comme induisant un risque négligeable, quitte à perdre un peu des performances du produit, surtout si ces qualités sont jugées comme non fondamentales dans l'utilisation, qu'elle soit à finalité industrielle ou grand public.

Pour cela, il est indispensable que les filières industrielles puissent trouver le bon équilibre dans un délai compatible avec les exigences réglementaires qui ne peut pour autant être reporté indéfiniment. Les travaux actuellement entrepris à l'échelle de l'Europe ont mis en évidence les substitutions possibles et sont donc une source d'inspiration réelle.

Les PFAS aux comportements inertes, rendant des services considérables dans des applications clés, doivent être identifiés pour guider, si aucune alternative n'est possible à court ou moyen termes, vers une production, un usage et une fin de vie qui garantissent l'absence de risques.

### **5.2. DÉFINIR DES CONDITIONS D'USAGES SANS RISQUES**

Les usages des PFAS étant extrêmement nombreux dans des domaines très variés, la connaissance de leur présence par les usagers et propriétaires passe par un marquage clair et par des consignes sur les moyens d'éviter les mésusages pouvant conduire à des relargages indésirables.

Lorsque les PFAS sont intégrés dans des produits finis (aussi variés que machines-outils, chaînes de production, robotique, cosmétiques, moyens de transport, électronique...), un des éléments fondamentaux réside dans la connaissance et l'identification de leur présence afin de maîtriser toute la chaîne d'utilisation, y compris la fin de vie vers la destruction totale.

Lorsque les usages correspondent à des dispersions volontaires ou incontrôlées de produits vers les environnements, ils doivent être supprimés si ce n'est déjà fait (mousses anti-incendie, pesticides, lubrifiants perdus, PFAS intégrés dans des usages au contact des aliments, produits volatils...).

### **5.3. PRODUIRE SANS POLLUER**

Les produits et matériels, hiérarchisés pour leur plus grande importance et sans alternative crédible à moyen terme, doivent être fabriqués :

- en utilisant des composants sans niveau de risque avéré ;
- en développant des unités de production dont les processus de fabrication sont élaborés et contrôlés comme ne pouvant ni contaminer les personnels, ni relarguer de composants indésirables vers l'environnement ce qui exige un contrôle régulier réalisé par un organisme indépendant.

Les exigences réglementaires européennes induisent le risque d'une exportation d'unités de production vers des pays à faibles contraintes réglementaires environnementales et sanitaires. Ce risque doit être limité par une politique de contrôle aux frontières, mais aussi être étudié plus largement en, considérant que la forte persistance des molécules polluantes dans l'environnement, fait que les contaminations planétaires (air, mer, fleuves,...) ne connaissant pas les frontières ce qui provoque une circulation planétaire et dans les aliments, y compris ceux importés. Cette préoccupation doit être intégrée dans les réglementations visant les importations.

## 5.4. SUBSTITUER

Introduire toute action de substitution, qu'elle concerne la production ou le remplacement de PFAS, à condition qu'elle soit réalisée par des produits ayant été préalablement évalués ou étant connus comme n'apportant aucun risque avéré ou nouveau pour l'environnement et la santé.

Tableau 5: Perspectives de substitution de PFAS selon les filières et les usages et indications de délais.

| Filières     | Principaux PFAS utilisés | Substitution possible                     | Délais envisageables          | Recommandations pour la bonne gestion de fin de vie                                                                                                               |
|--------------|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aéronautique | PFPE, FKM, PVDF, ECTFE   | Au cas par cas                            | 7 à 10 ans selon applications | Gérer la question des PFAS dans la filière aéronautique (identification et documentation, déconstruction, recyclage ou destruction)                               |
| Agrochimie   | Petites molécules        | Biotechs, éliciteurs                      | Partiellement en cours        | Réduire les usages des molécules actives fluorées (suppression, réduction substitution). Prévoir la dépollution des sols et réserves d'eau (nappes, rivières,...) |
| Automobile   | PTFE, PFPE, FKM, PVDF    | Au cas par cas                            | 5 à 10 ans selon applications | Gérer la question au sein de la filière automobile: identification, déconstruction, recyclage ou destruction                                                      |
| Bâtiment     | ECTFE, PVDF              | Thermoplastiques, silicones               | <5 ans                        | Gestion à mettre en place dans la filière: identification et étiquetage, déconstruction, recyclage ou destruction                                                 |
| Batteries    | PVDF                     | Autres batteries (Solid state, Na, Zn...) | 5 à 10 ans mini               | Gérer dans la filière polymères des batteries: étiquetage et identification, démontage: recyclage ou destruction                                                  |
| Câblerie     | ECTFE, PTFE, FKM         | Élastomères thermoplastiques              | 5 à 10 ans                    | Gérer dans la filière électrique: étiquetage et identification des câbles concernés, démontage: recyclage ou destruction                                          |

| Filières                                                         | Principaux PFAS utilisés                       | Substitution possible                                                                                                               | Délais envisageables               | Recommandations pour la bonne gestion de fin de vie                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cosmétiques et produits de soins personnels                      | PTFE, tensioactifs fluorés                     | Silicones, cires, biopolymères                                                                                                      | En cours                           | Interdiction recommandée car usage diffus et usage non indispensable                                                                     |
| Cuisine : antiadhésifs                                           | PTFE                                           | Substitution avec performance équivalente inconnue à ce jour<br>Céramiques, fonte, inox : performance ou durabilité non équivalente | 5 ans mini                         | Destruction des produits existants par mise en place en cours de filières de récupération ustensiles puis recyclage/ destruction         |
| Électronique et semi-conducteurs                                 | PFPE, tensioactifs fluorés, F-polyimides, PVDF | Silicones, hydrocarbures, sulfonic acids                                                                                            | 10 à 20 ans selon les applications | Destruction thermique des résidus contenant des PFAS après recyclage des métaux.                                                         |
| Gaz réfrigérants                                                 | HFC (F-méthane, éthane)                        | NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , TFA, propane, alcools                                                                           | En cours                           | Substitutions par molécules non fluorées et destruction des gaz réfrigérants en fin de vie. Dans les filières                            |
| Hydrogène (piles à combustible polymères)                        | PFSA                                           | Polysulfones                                                                                                                        | > 10 ans                           | Gérer dans la filière hydrogène : étiquetage et identification des équipements concernés, démontage : recyclage ou destruction           |
| Industrie manufacturière (joints, revêtements, vannes, tubes...) | PTFE, FKM, ECTFE, PFPE, PVDF                   | Nickel, titane, graphite, fibres, thermoplastiques, Hastelloy, verre                                                                | 5 à 10 ans                         | Substitution chaque fois que possible et destruction thermique des déchets.                                                              |
| Lubrifiants industriels                                          | PFPE                                           | Graphite, MoS <sub>2</sub>                                                                                                          | 5 ans mini                         | Substitution                                                                                                                             |
| Médical (Appareils ou fournitures, dont textiles)                | FKM, PTFE, PVDF                                | Difficile                                                                                                                           | > 10 ans                           | Destruction des DASRI fluorés dans des filières thermiques qualifiées.                                                                   |
| Membranes de filtration                                          | ECTFE, PVDF,                                   | Céramiques, sulfones                                                                                                                | Environ 8 ans                      | Gérer dans la filière traitement des eaux : étiquetage et identification des équipements concernés, démontage : recyclage ou destruction |

| Filières                                                                       | Principaux PFAS utilisés              | Substitution possible                              | Délais envisageables               | Recommandations pour la bonne gestion de fin de vie                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pétrole et activités minières                                                  | Tensioactifs fluorés, PTFE, PVDF, FKM | Autres, tensioactifs thermoplastiques, élastomères | 5 ans au moins selon les cas       | Interdiction des tensioactifs fluorés. Destruction en fin de vie des tuyaux et des connecteurs fluorés.                             |
| Peintures, Revêtements ou vernis                                               | PTFE                                  | PPV, Epoxy, Polyester, Mélamine                    | En cours                           | Réduire et éviter car usages diffus                                                                                                 |
| Photovoltaïque                                                                 | ECTFE                                 | EVA                                                | <5 ans                             | Gérer dans la filière photovoltaïque : étiquetage et identification des équipements concernés, démontage : recyclage ou destruction |
| Pompes à chaleur (liquides utilisés)                                           | HFC (F-méthane, éthane)               | NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , TFA, propane   | > 5 ans                            | Substitutions par molécules non fluorées et destruction des gaz réfrigérants en fin de vie.                                         |
| Revêtements des emballages alimentaires                                        | PTFE, FKM                             | Polyoléfines, argiles, cires, biopolymères         | En cours (moindres performances)   | Usage non essentiel, interdiction recommandée                                                                                       |
| Pharmacie                                                                      | Petites molécules                     | Biotechs                                           | Selon molécules et maladie traitée | Traitement des effluents et des eaux usées par les STEP's municipales                                                               |
| Textiles Imperméabilisation à l'eau et l'huile, antistatiques, textiles, tapis | PTFE                                  | Polyoléfines, cires, acrylates, tensioactifs       | En cours <5 ans                    | Usage à restreindre puis interdire car non essentiel.                                                                               |

Le tableau 5 (ni exhaustif, ni limitatif) illustre le nombre considérable des domaines concernés et la difficulté, sauf dans certains cas précis, à trouver des substitutions fiables, à performance identique, dans un délai rapide. L'ONG ChemSec – *The International Chemical Secretariat* a recensé une grande liste des usages de produits PFAS et des alternatives possibles qu'elle rend disponible dans un tableur en ligne<sup>66</sup>. Le document « PFAS:

66 Chemsec, PFAS and alternatives, [https://chemsec.org/app/uploads/2023/04/Excel\\_ChemSec-Electronics-Guide.xlsx](https://chemsec.org/app/uploads/2023/04/Excel_ChemSec-Electronics-Guide.xlsx). Consulté mai 2025.

*Application, technical functions and substitutions possibilities in the industry*<sup>67</sup> » illustre aussi cette difficulté de passer d'une substitution putative au laboratoire à une vraie substitution industrielle. Des études détaillées sur les domaines semiconducteurs, batteries, médical, ou hydrogène peuvent être consultées<sup>68</sup>.

Cette illustration de la diversité des usages et des difficultés de substitution montre l'impact considérable qu'aurait une interdiction trop rapide de certains PFAS sur le monde socio-économique. Pour autant, elle montre aussi l'importance considérable d'accélérer les actions sur la recherche d'alternatives pertinentes, mais industriellement valides. Pour cela il est fondamental de définir précisément, et au cas par cas, les enjeux industriels et sociétaux associés à chacune des utilisations de PFAS, le degré d'impact d'un bannissement rapide, d'évaluer le caractère réaliste des substitutions proposées et de mettre en œuvre, à chaque fois que possible, les moyens scientifiques et technologiques nécessaires à la mise à disposition de la solution de substitution, ou bien d'accepter de ne plus utiliser la fonction spécifique pour des applications considérées comme non essentielles.

---

67 Lang-Koetz C, Hutschek U, Heil M.

[https://opus-hspf.bsz-bw.de/files/443/RZ\\_THINKTANK\\_PFAS\\_A4\\_EN\\_web.pdf](https://opus-hspf.bsz-bw.de/files/443/RZ_THINKTANK_PFAS_A4_EN_web.pdf)

68 Semiconducteurs :

<https://www.semiconductors.org/the-impact-of-a-potential-pfas-restriction-on-the-semiconductor-sector/?->

Batteries :

[https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2023/06/RECHARGE-FIRST-submission\\_.pdf](https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2023/06/RECHARGE-FIRST-submission_.pdf)

« Medtech » :

[https://www.eflm.eu/upload/docs/230227\\_MTE\\_PFAS\\_Briefing\\_DRAFTV3.pdf](https://www.eflm.eu/upload/docs/230227_MTE_PFAS_Briefing_DRAFTV3.pdf)

Hydrogen Europe :

[https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2023/02/Hydrogen-Europe-position-paper-on-PFAS-ban\\_v12\\_FINAL.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2023/02/Hydrogen-Europe-position-paper-on-PFAS-ban_v12_FINAL.pdf)

## **5.5. METTRE EN ŒUVRE DES FILIÈRES DE COLLECTE/ÉLIMINATION DES DÉCHETS ET DES PRODUITS EN FIN DE VIE CONTENANT DES PFAS**

### **5.5.1. UNE COLLECTE COMPLÈTE**

Cet enjeu concerne autant les déchets de production que les matériels industriels contenant des éléments PFAS (fluides, solides...) et de très nombreux produits de la vie courante (habillement et mobiliers imperméabilisés, matériels de cuisson, emballages...).

Après usage, une fin de vie bien gérée des produits concernés passe par une récupération et une collecte qui doivent être exemplaires. Ceci ne peut se réaliser que par l'identification précise des produits et objets contenant des PFAS dont l'acheminement et le transport vers les centres de destruction doivent être parfaitement organisés de manière concertée au niveau européen.

Un marquage est indispensable pour guider les acteurs des filières de récupération/tri/destruction. Il correspond à une innovation majeure qui n'a que peu d'exemples actuellement.

### **5.5.2. UNE DESTRUCTION GARANTIE SANS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

Que ce soit pour des produits et matériaux manufacturés en fin de vie, ou pour des matériaux qui se saturent en PFAS dans le processus de dépollution des eaux et de l'air (charbon actif, résines...), les filières de destruction ou de recyclage doivent être développées pour répondre à une demande croissante.

Les incinérateurs de déchets ménagers actuels ne permettent pas la minéralisation complète et sans risque de ces produits. Il faut donc mettre en place des filières plus performantes à des températures supérieures à 1000°C sous atmosphère contrôlée et avec traitement des fumées pour éviter l'émission de sous-produits fluorés en cas de minéralisation incomplète. Selon les types de PFAS des températures standard peuvent suffire à obtenir une minéralisation complète. Toutefois les émissions de HF,

produit ultime de dégradation doivent effectivement être neutralisés (plusieurs techniques disponibles dont la réaction avec du calcium).

L'Ineris a actualisé son étude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS<sup>69</sup>. La synthèse précise que leur destruction complète renvoie à la minéralisation complète et le fluor est alors retrouvé sous forme de fluorure d'hydrogène (HF). Celui-ci étant toxique et très corrosif, les fumées doivent donc être traitées pour l'éliminer.

Une température supérieure à 1300°C (voire 1400°C) garantit une minéralisation certaine de toutes les molécules PFAS et sous-produits générés. Pour des températures inférieures, la plupart des études citées s'accordent à dire qu'une température supérieure à 1000°C permettrait de minéraliser complètement (pour certaines études) ou quasi-complètement les PFAS (moins de 1% de sous-produits de décomposition restants). La minéralisation des PFAS par incinération va dépendre de nombreux paramètres: de la matrice déchet incinérée (composition et typologie du flux de déchets considéré, nature et concentrations des molécules et produits PFAS...) ainsi que des conditions opératoires (température, temps de séjour, teneur en oxygène, turbulence...).

Les températures de combustion des incinérateurs classiques, tels que les incinérateurs d'ordures ménagères (entre 750°C et 1100°C pour les fours à grille) ou de boues d'épuration (habituellement entre 850 et 900°C pour les fours à lits fluidisés denses) ne sont pas suffisantes pour garantir une minéralisation complète de tous les PFAS. La dégradation dans les incinérateurs va ainsi générer des quantités plus ou moins importantes de PFAS de chaînes plus courtes, plus stables thermiquement. Les incinérateurs de déchets dangereux (plage de température de combustion entre 1100 et 1300°C) ainsi que les cimenteries peuvent garantir ces températures élevées. Les PFAS non minéralisés lors de l'incinération vont se retrouver soit dans les mâchefers, soit être captés par les systèmes d'épuration des fumées, soit être émis dans l'air ce qui exige des systèmes d'épuration des fumées.

---

69 <https://www.ineris.fr/fr/etude-bibliographique-thermodegradation-pfas>

D'autres technologies existent, mais elles sont moins développées et certaines sont à des niveaux expérimentaux<sup>70</sup>. Des centres de destruction de référence doivent donc être structurés, comportant des zones de stockage protégeant l'environnement, et des unités de traitement à performance garantie et contrôlée de l'absence de pollution.

### 5.5.3. UN TRAITEMENT DES EAUX

Parmi les sources de diffusion vers l'environnement de PFAS figurent notamment des rejets liquides industriels, des rejets de stations d'assainissement des eaux usées (STEU) ou d'autres sources ponctuelles comme les rejets d'eaux pluviales d'aéroports ayant utilisé des mousses anti-incendie à base de PFAS.

Compte tenu des enjeux financiers considérables pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles contaminées, il est essentiel de poursuivre et intensifier l'identification des sources principales de PFAS de rejets vers les masses d'eau car une grande partie de cette contamination ne passe pas par les STEU urbaines.

La contamination des sédiments avec une accumulation depuis des décennies, sera pour très longtemps une source diffuse de transfert de PFAS vers les eaux.

La nouvelle directive «Eaux résiduaires urbaines» 2024/3019 (DERU 2) introduit une obligation de surveillance en entrée de STEU urbaine et la mise en place progressive de traitement supplémentaire «quaternaire», la quatrième étape après un traitement primaire, secondaire et tertiaire, sur les grosses stations d'épuration (plus de 150 000 équivalent habitants) de manière à éliminer les principaux flux polluants. Cette directive n'est pas encore transposée en droit français (au plus tard le 31 juillet 2027). Un projet d'arrêté encadrant la surveillance d'une vingtaine de PFAS en entrée et sortie des 1300 STEU urbaines de plus de 10 000 EH est en cours

---

70 Winchell LJ, Ross JJ, Wells MJM, Fonoll X, Norton JW, Bell KY, Thermal destruction at water resource recovery facilities: A state of the science review, *Water environm.*, 2021, Res., 93, 6, 826-843.

d'étude dans le cadre du plan interministériel PFAS d'avril 2024. Il faut toutefois déjà noter la complexité des analyses dans l'assainissement en raison de la complexité de la matrice en matières organiques et particules et la directive recommande que soit développée une méthode harmonisée de mesure du «total PFAS» dans ce type d'eaux. Les analyses sont souvent réalisées sur la partie liquide qui peut sous-représenter la réalité. Il importe de développer des campagnes d'analyse, sur la base de méthodes et de protocoles reconnus, pour bien évaluer la situation et permettre ainsi de mettre en place des traitements complémentaires adéquatement dimensionnés. En présence de PFAS à des concentrations significatives en entrée de STEU urbaine, une étude devra être menée pour déterminer leur(s) origine(s) au sein du réseau de collecte: rejets de sites ponctuels ou rejets diffus domestiques ? Il sera également nécessaire et intéressant de procéder à une évaluation de l'impact, sur les eaux usées urbaines et industrielles, des mesures réglementaires visant à réduire la présence de PFAS dans les textiles usuels, les cosmétiques, les produits ménagers. Les traitements dits «quaternaires» en assainissement, c'est-à-dire en fin de chaîne sur des eaux déjà épurées selon les critères actuels, sont coûteux et donc doivent être ciblés sur les flux les plus importants à court et long terme pour réduire au mieux les impacts. Les filtrations sur charbons actifs de préférence en grains car pouvant être régénérés (recyclés après traitements thermiques adéquats) sont très coûteuses (de l'ordre de l'euro par m<sup>3</sup>). Le parlement européen introduit la notion nouvelle de faire payer aux producteurs de produits le coût de la surveillance et du traitement engendrés par les polluants qui se retrouvent dans les eaux usées traitées par les stations d'épuration urbaines selon la notion de «responsabilité élargie des producteurs». Les deux filières désignées à ce jour par la nouvelle directive «eaux usées» (DERU) sont les filières pharmaceutiques et cosmétiques. Si le principe de pollueur payeur existe déjà depuis la création des agences de l'eau il y a plus de 50 ans, ce principe était appliqué en fonction des rejets des effluents de chacun. Est introduite ici une notion «collective» des producteurs qui mettent sur le marché des produits contaminants qui se retrouveront dans les eaux usées urbaines via l'usage de produits pharmaceutiques ou cosmétiques par les particuliers. La mise en œuvre de cette notion reste à réaliser.

Si les techniques de mises en œuvre de filtration sur charbons actifs en grains sont bien maîtrisées en France par les principaux opérateurs, il faut signaler la dépendance par rapport à la fourniture de ces matériaux, principalement importés, et aux installations destinées à leur régénération. Une politique lourde de mise en œuvre de traitement des eaux (usées ou potables voir plus loin) doit donc être accompagnée par une réindustrialisation française/européenne pour la fourniture et la régénération de charbons actifs par des contrats long terme.

Concernant la régénération des charbons actifs (CA) saturés de PFAS lorsqu'ils sont employés pour traiter des eaux ou des effluents gazeux, certains producteurs de CA annoncent la possibilité de régénération propre (au sens des PFAS détruits) mais les procédés sont confidentiels. La revue de Gagliano *et al.*<sup>71</sup> détaille les données publiées sur les procédés de régénération. Le chauffage simple graduel (de 400 à 950 °C) avec traitement des fumées par oxydation serait efficace à plus de 99 %. Une efficacité relative à optimiser est observée avec le chauffage par micro-ondes. Le traitement hydrothermique sous pression dont les températures sont moyennes n'apparaît pas suffisamment satisfaisant. La combustion lente sans flamme et l'utilisation de sels fondus (notamment la soude) n'apparaissent pas satisfaisants selon les auteurs qui concluent que malgré les progrès récents, les procédés doivent encore être améliorés en particulier pour éviter la diffusion de molécules fluorées hors de l'unité de régénération.

Certaines résines pouvant être employées dans la dépollution des effluents liquides ou eaux potables posent le même problème de fourniture et de traitement des concentrés récupérés.

## 5.6. DÉPOLLUER LES MILIEUX CONTAMINÉS

L'environnement mondial est, et restera, largement pollué par les rejets passés, actuels et probablement encore à venir malgré la prise de

---

71 Gagliano E, Falciglia PP, Zaker Y *et al.*, State of the research on regeneration and reactivation techniques for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)-laden granular activated carbons (GACs), *Curr. Opinion Chem. Engin.*, 2023, 42, 100955.

conscience. Quelles que soient les décisions de gestion en développement, il restera obligatoire de viser à la dépollution des compartiments pollués de l'environnement d'une façon générale. La suppression des molécules polluantes actuellement accumulées ne pourra se faire que très progressivement. Il s'agit donc, dans un premier temps, de traiter certains secteurs spécifiques de façon à protéger les populations, la faune ou la flore en fonction du type plus spécifique de menace.

#### **5.6.1. TRAITER LES EAUX DESTINÉES À UN USAGE SANITAIRE**

Dans le domaine de la production des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), les normes de qualité, en phase transitoire, rendent déjà obligatoire, dans certains cas, la mise en place de traitements. Ces normes vont certainement être durcies dans l'avenir. L'utilisation de charbon actif ou de résines échangeuses d'ions adaptées sont des technologies de traitements efficaces. Néanmoins, une fois saturés, les produits adsorbants doivent être régénérés dans des centres spécialisés permettant de détruire les PFAS ainsi captés dans les eaux ou être détruits sans risques. Les techniques de filtration sur charbon actifs sont bien maîtrisées par les opérateurs français. L'optimisation (choix du type de charbon ou d'adsorbant, fréquence et méthode de régénération) est un point important pour maîtriser les coûts d'un tel procédé. Une filière de production de charbons actifs de qualité optimisée devrait être développée en France.

Considérant la très large pollution des ressources en eaux et l'exigence de conformité aux normes de potabilité, de nombreuses communes sont déjà concernées en France et l'impact sur le prix de l'eau sera significatif.

Des traitements par rétention membranaire des eaux permettent de bloquer les PFAS. Certaines de ces membranes commercialisées pour la dépollution des eaux sont elles-mêmes structurées à base de matériaux PFAS très résistants. Leur usage en tant que méthode de dépollution étant fondamental dans la production d'EDCH, ceci confirme la nécessité de garantir la continuité d'existence pour les matériaux dans une filière d'usage sans risques. Il convient également de prendre en compte que les PFAS retenus par les membranes se retrouvent dans les éluats

(volumes de concentrés membranaires) qui doivent également être traités et détruits pour ne surtout pas être remis dans l'environnement. L'impact économique est important. La tentation est souvent de rendre à la rivière ce qu'elle a amené... solution inacceptable à terme.

En espérant que, suite aux mesures de restrictions prises, la qualité des eaux superficielles continentales s'améliore, une très longue période sera nécessaire pour que les eaux souterraines dont le taux de renouvellement est plus lent retrouvent leur qualité. Il est donc actuellement fondamental d'adapter les filières de production des EDCH pour garantir la conformité aux normes européennes actuelles et à venir ce qui est possible en France.

Dépolluer toutes les eaux continentales avant leur arrivée en mer ainsi que les sédiments n'est pas envisageable. La stratégie d'interdiction d'usage de PFAS est donc bien destinée à diminuer rapidement les charges polluantes vers la mer et les océans, en éliminant les usages inutiles ou moins utiles et en favorisant les substitutions sans risques.

### **5.6.2. DÉPOLLUER LES SOLS**

La dépollution des sols est coûteuse et complexe. Comme pour d'autres pollutions, les technologies se basent sur des procédés *in situ* ou *ex-situ*.

*Ex-situ*, le principe consiste à volatiliser ou lixivier les polluants pour ensuite les adsorber sur des supports qui seront détruits. L'incinération dans des systèmes, notamment à lits-fluidisés, à des températures supérieures à 1 000°C peut réduire les contaminations à des niveaux non détectables dans les fumées.

*In situ*, des solutions visent à « stabiliser » la pollution localement pour éviter sa diffusion vers les nappes souterraines. Il ne s'agit donc pas d'éliminer les PFAS, mais de les fixer pour éviter qu'ils ne migrent vers des zones entraînant des risques sanitaires ou environnementaux plus forts.

Des solutions possibles sont proposées par électrochimie, oxydation, biodégradation (même si la résistance de ces molécules rend cette hypothèse limitée à certaines molécules), phytoremédiation avec

destruction des plantes contaminées, etc. Nombre de celles-ci restent encore exploratoires ce qui implique de développer la veille et le soutien à l'innovation sur les solutions les plus fiables et économiquement acceptables au regard des références déjà validées et reconnues. Plusieurs articles de revue décrivent les forces et limites des méthodes pour les sols<sup>72, 73, 74, 75</sup>.

Compte tenu de ces remarques, une politique de dépollution doit être sélective avec des objectifs précis d'amélioration de la situation sanitaire ou environnementale, permettant de réduire les risques identifiés.

Au vu de la complexité de la mise en œuvre des traitements de dépollution, il apparaît aisément pourquoi la stratégie doit être orientée vers une limitation forte de l'usage des PFAS et, lorsque ceux-ci s'avèrent nécessaire pour un usage spécifique, s'assurer qu'à l'issue de l'usage, les matériaux contenant des PFAS soient collectés, triés et parfaitement détruits.

Toutes les actions de prévention seront largement moins onéreuses que celles curatives.

- 
- 72 Kang YG, Birch QT, Nadagouda M N, Dionysiou DD, Advanced destruction technologies for PFAS in soils: Progress and challenges, *Curr. Opinion Environm.*, 2023, Sci. Health, 33, 100459, ISSN 2468-5844.
- 73 Travar I, Uwayezu JN, Kumpiene J, Yeung LWY, Challenges in the PFAS Remediation of Soil and Landfill Leachate: A Review. *Adv. Environ. Eng. Res.*, 2021, 2, 2 doi: 10.21926/aeer.2102006.
- 74 Rouch SE, Khudur D, Thomas LS *et al.*, Challenges and Current Status of the Biological Treatment of PFAS-Contaminated Soils. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2021, 8: 602040. doi: 10.3389/fbioe.2020.602040.
- 75 Mahinroosta R, Senevirathna L, A review of the emerging treatment technologies for PFAS contaminated soils, *J. Environm. Management*, 2020, 255, 109896, ISSN 0301-4797.

## Chapitre 6

### **RECOMMANDATIONS**

Il est indispensable d'assurer la prise en compte précise et objective des enjeux liés à la réduction, voire la disparition, des PFAS et produits et matériels en contenant, dans toutes les étapes des activités: la R&D, l'approvisionnement (importations, transports...), les stockages (matériaux résistants et inertes...), la production et les conditionnements (intégration de PFAS dans les machines et matériels de production, emballages inertes...), l'usage, la distribution et les éléments de la Responsabilité Sociétale des Entreprises. Ceci amène aux recommandations suivantes, sur plusieurs points majeurs concernant la production de PFAS et leurs usages dans les process et produits industriels, l'usage des produits manufacturés contenant des PFAS, les rejets et recyclage des produits contenant des PFAS ainsi que la destruction de leurs PFAS, la décontamination de l'air, des eaux, ou des sols. Ces recommandations s'adressent selon les cas, aux pouvoirs publics, aux industriels ou aux citoyens.

#### **6.1. COMMUNICATION ET PÉDAGOGIE INDISPENSABLES**

Compte tenu des manques de connaissance générale concernant les divers composés PFAS ou à base de PFAS et des confusions concernant les niveaux de risques, il importe aux pouvoirs publics et aux industriels de communiquer clairement et en toute transparence sur la nature des PFAS, avec leur diversité (molécules, élastomères, polymères), leurs propriétés les risques relatifs, afin d'éviter de généraliser et d'explicitier clairement les balances bénéfices-risques selon la nature des molécules mises en œuvre.

#### **6.2. HIÉRARCHISATION DES RISQUES**

Les acteurs du domaine (industriels, agences d'évaluation des risques nationales et européennes et régulateurs) doivent collaborer pour aider à

la hiérarchisation objective des risques, reposant sur des bases robustes et transparentes, afin de finaliser la définition des objectifs prioritaires en termes de substitution, d'interdiction, de restriction, d'autorisation transitoire, aussi bien en termes de production nationale que de règles d'importations. Ceci permet aussi d'envisager les produits et matériaux à conserver en raison de leur importance fondamentale sous réserve d'une fabrication et d'une fin de vie sans risques de pollutions.

### **6.3. FABRICATIONS DE POLYMÈRES JUGÉS INDISPENSABLES PAR MANQUE D'ALTERNATIVES VALIDÉES**

Sanctuariser une production et une utilisation « responsables » de polymères non substituables quand ils s'avèrent indispensables à la sécurité des personnes et des équipements stratégiques essentiels à la souveraineté du pays, sanitaire, industrielle, aéronautique, spatiale et militaire.

Garantir les conditions de production des polymères fluorés sans recours à des PFAS à toxicité avérée et d'émissions dans l'environnement : imposer des procédés mettant en œuvre des molécules sans risque avéré et des unités de production et de transformation dont la sécurité environnementale est garantie et contrôlée.

Mettre en place, conformément aux orientations du Plan d'actions interministériel, un programme de recherches sur les méthodes intégratives d'analyse des traces de PFAS dans les émissions vers l'environnement et dans les produits industriels.

### **6.4. CONTRÔLE DES IMPORTATIONS**

Les restrictions imposées en Europe ne doivent pas conduire à importer des produits, matériels et matériaux susceptibles de relargages de composés indésirables dans l'environnement et de charger les filières nationales de traitement des déchets. Des normes de qualité doivent être imposées sur les produits importés associées à des garanties de contrôle et l'obligation d'un marquage sur la présence de PFAS ou de produits à base de PFAS, y compris dans les composants intégrés.

Lutter contre l'importation de PFAS cachés dans des produits étrangers ou produits dans des usines polluant l'environnement, en interdisant et pénalisant l'importation de produits incorrectement labellisés ou ne respectant pas les meilleures normes de production en s'inspirant de ce qui est fait dans l'industrie alimentaire ou de santé (autorisation administrative de mises sur le marché).

## **6.5. CONCERNANT LES USAGES**

Éviter, selon les orientations des résultats de la hiérarchisation des produits à risques, tous les nouveaux usages et les intégrations si possible par engagement volontaire des industriels intégrateurs et transformateurs et à défaut par une réglementation adaptée.

En complément des interdictions qui concernent ou vont viser les déversements volontaires de produits PFAS dans l'environnement, il importe de rendre visible la présence de PFAS dans les produits et, pour cela, rendre obligatoire la mise en place, au moins au niveau européen, d'un marquage industriel de cette présence.

Guider les consommateurs par la diffusion claire des éventuelles règles d'usage garantissant l'absence de risques et informant sur les méthodes et dispositions de collecte, tri, destruction auxquelles ils doivent participer.

Dynamiser les actions de substitutions avec garantie de l'absence de risques associés, application par application, et mettre en place un processus rigoureux de validation des solutions de substitution proposées. Pour cela il convient d'identifier des solutions industrielles existantes ou soutenir des travaux scientifiques et technologiques, avec évaluation des horizons de temps, de l'impact économique et de la disponibilité de la solution de remplacement.

## **6.6. LUTTER CONTRE LES RISQUES DE DISSÉMINATION**

La diffusion des PFAS, de leurs produits et des particules de dégradation, suite aux usages répétés et à l'usure de matériaux à base de PFAS, doit être mieux documentée, notamment par la mise à disposition ou la réalisation d'études sur l'impact de l'usure des polymères.

## **6.7. IMPORTANCE DES COLLECTES ET DU TRI**

Compte tenu de la persistance environnementale et de l'exigence de filières spéciales de destruction, il importe de contrôler la fin de vie des produits, matériels et matériaux contenant des PFAS en imposant :

- la collecte et le tri sélectif grâce aux marquages obligatoires et aux recommandations pour les usagers ;
- la mise en place d'un réseau de récupération (collecte et tri) spécialisé par filières préalable au traitement (recyclage ou destruction) des composants fluorés.

## **6.8. ORGANISER UNE DESTRUCTION SANS RISQUES**

Organiser la destruction en fonction des réseaux de récupération, en particulier en centres d'incinération dédiés de tout produit contenant des PFAS non recyclables.

Pour une meilleure fiabilité, il convient de structurer un nombre restreint de sites de destruction en collaboration avec les pays européens voisins. Ils doivent garantir une innocuité pour l'environnement dont le contrôle doit être garanti par un organisme indépendant.

## **6.9. S'APPUYER SUR LES FILIÈRES**

Pour les opérations de collecte/tri/destruction, il convient de s'appuyer sur les filières existantes des REP (Responsabilité élargie des producteurs). Il existe en effet 21 filières identifiées aujourd'hui entraînant une REP permettant ainsi de couvrir un grand nombre de secteurs utilisant peu ou prou des PFAS.

Parallèlement, les filières doivent réduire les usages en s'engageant dans une trajectoire drastique de réduction dans chaque chaîne de valeur et, pour cela, identifier de la manière la plus exhaustive possible la présence des PFAS, parfois ignorée même de bonne foi, dans ces chaînes de valeur.

## **6.10. REMÉDIER AUX POLLUTIONS EXISTANTES**

Garantir l'indépendance nationale dans l'approvisionnement en technologies de dépollution des milieux (membranes, charbon actif, filière de régénération du charbon) et améliorer ces filières de façon à permettre un déploiement maîtrisé en fonction des besoins croissants.

## Annexes

### A. Membres du groupe de travail

- Diane d'ARRAS (ex-directrice Recherche et Innovation, Suez)
- Paul-Joël DERIAN (Avril, directeur Innovation, Développement Durable et Incubateur)
- Yves LÉVI (Université Paris-Saclay, professeur honoraire de Santé publique)
- Patrick MAESTRO (EuroCASE, secrétaire général, ancien directeur scientifique Solvay)

## B. Personnes auditionnées

- Armand AJDARI (Arkema directeur R&D)
- Virginie GUERIN (Arkema, directrice Relations Institutionnelles)
- David SILAGY (Arkema, directeur R&D polymères de haute performance)
- Jean-François GERARD (CNRS Chimie, directeur scientifique adjoint)
- Sébastien LAGOUTTE (CNRS direction des entreprises, responsable coopération filière chimie et matériaux)
- Magalie SMETS (France Chimie, directrice générale)
- Corine LIGNET (GIFAS - Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales, directrice adjointe)
- Baptiste VOILLEQUIN (GIFAS - Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales, directeur aux Affaires R&D, Espace et Environnement)
- Pierre BOUCARD (Ineris, ingénieur économiste)
- Jean-Marc BRIGNON (Ineris, chef de l'unité Économie et aide à la décision pour l'environnement)
- Olivier BRAULT (Groupe SEB, vice-président, affaires publiques)
- Pierre LAFFONT (Groupe SEB, directeur affaires institutionnelles européennes)
- François LECLEIRE (Groupe SEB, directeur projets stratégiques et anticipation)
- Gilles BOULANGER (Suez, directeur du CIRSEE, Centre de recherche de Suez)
- Delphine STEINMAN (Suez, ingénieurs procédés)
- Christophe COUESNON (Syensqo, directeur Syensqo France)
- Malik DUHAUT (Syensqo, directeur affaires extérieures)
- Geoffroy SIGRIST (Syensqo, directeur affaires gouvernementales et publiques, France)
- Jean-Francis SPINDLER (Syensqo, directeur centre de recherches Lyon)

- Natalia SCHERBAKOFF (Trinseo, directrice R&D)
- Xavier CHAUCHERIE (Veolia/Sarpi, expert génie des procédés)
- Nicolas HUMEZ (Veolia/Sarpi, directeur performance & orientation métiers)

Ce rapport a été relu par Jean-Pierre CHEVALIER et Gérard PAYEN membres de l'Académie des technologies.

Ce rapport a été visé par le Comité d'éthique de l'Académie des technologies présidé par Bruno STOUFFLET.

Le Rapport a été adopté par l'Académie lors de la séance plénière du 10 septembre 2025.

## C. Glossaire et acronymes

**2 FTOH** : 2-perfluorohexyl-ethanol

**DERU** : Directive eaux résiduaires urbaines

**ECHA** : Agence européenne pour la chimie

**ECTFE** : EthylèneChloroTriFluoroEthylène

**REP** : Les filières à responsabilité élargie des producteurs (REP) reposent sur le principe de responsabilité élargie du producteur, reconnu dans la directive-cadre européenne sur les déchets.

Selon ce principe, les producteurs, c'est-à-dire les personnes qui mettent sur le marché certains produits, peuvent être rendus responsables du financement ou de l'organisation de la prévention et de la gestion des déchets issus de ces produits en fin de vie.

**FKM** : Fluorine Kautschuk Material (caoutchoucs sur base fluorure de vinylidène)

**HFC** : HydroFluoroCarbure

**Ineris** : Institut national de l'environnement industriel et des risques

**PBT** : Indice de persistance dans les compartiments de l'environnement (air, eaux, sols), de bioaccumulation dans les organismes biologiques et de toxicité permettant de caractériser les principaux dangers d'un produit chimique.

**PFAA** : Acides perfluoroalkyles

**PFAS** : Molécules de synthèse à structure per- et polyfluoroalkylées, c'est-à-dire contenant des groupes chimiques avec plusieurs molécules de fluor.

**PFBA** : Acide PerFluroButanoïque

**PFBS** : Acide PerfluoroButaneSulfonique

**PFCA** : Acides Perfluoroalkylcarboxyliques

**PFHxA** : Acide PerFluoroHexanoïque

**PFHxS** : Acide PerfluoroHexaneSulfonique

**PFOA** : Acide Perfluorooctanoïque

**PFOS** : Acide Perfluorooctane sulfonique

**PFPE** : PerFluoroPolyEther

**PFSA** : Acides perfluoroalkylsulfoniques

**Polymère** : Macromolécule, formée d'unités de molécules dites « monomères » liées entre elles.

**POP** : Polluant Organique Persistant. Molécule organique, généralement de synthèse, dont la résistance à la dégradation naturelle conduit à une très grande persistance et donc une pollution généralisée des milieux.

**PTFE** : PolyTétraFluoroEthylène

**PVDF** : PolyVinylDiFluoride (polyfluorure de vinylidène)

**REACH** : Règlement européen concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces produits (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*).

**STEU** : Station d'assainissement des eaux usées

**TFA** : Acide trifluoroacétique

Depuis plus de 80 ans, les PFAS sont présents dans de très nombreux secteurs de notre quotidien : énergie, aéronautique, automobile, électronique, médical, agrochimie, emballages, textiles, etc... Leur succès repose sur des propriétés chimiques exceptionnelles. Mais, derrière cette performance se cache une réalité alarmante : une pollution planétaire persistante, des risques sanitaires graves, et des défis technologiques complexes.

Ce rapport stratégique propose une lecture claire et structurée d'un problème mondial en pleine évolution. Il éclaire les enjeux industriels, les impacts sur la santé et l'environnement, les réponses réglementaires en cours, et surtout, les solutions concrètes pour une transition maîtrisée.

Un document essentiel pour les décideurs, les industriels, les chercheurs et les citoyens engagés.

Académie des technologies  
Le Ponant – Bâtiment A  
19, rue Leblanc  
75015 PARIS  
+33(0)1 53 85 44 44  
[secretariat@academie-technologies.fr](mailto:secretariat@academie-technologies.fr)  
[www.academie-technologies.fr](http://www.academie-technologies.fr)

ISBN : 979-10-97579-67-8



Couverture : Image générée à l'aide de l'IA -  
D'après Megane Ad - Adobe Stock