

# PFAS : vers une transition maîtrisée entre usages stratégiques et pollution planétaire

Diane d'Arras, Paul-Joël Derian, Yves Lévi, Patrick Maestro

[https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/10/202510\\_PFAS.pdf](https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/10/202510_PFAS.pdf)

5

## Contexte: PFAS, des « polluants éternels » : caractéristiques physico-chimiques

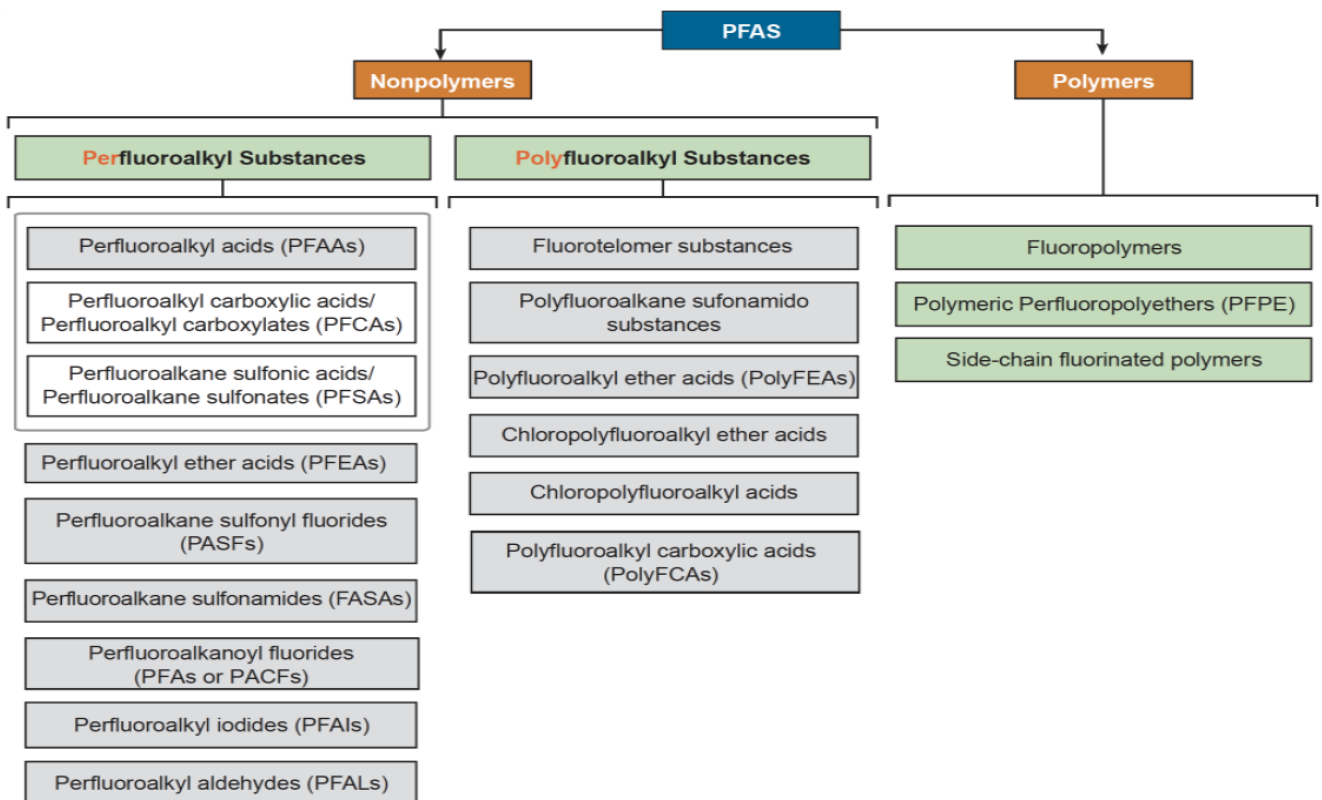
- **Molécules et matériaux aux propriétés exceptionnelles**, stabilité chimique et thermique remarquable.
- **Différences de comportement significatives** entre polymères de haute masse, inertes, et les petites molécules solubles ou volatiles et toxiques.
- **Impacts très variables selon masse moléculaire et groupements fonctionnels complémentaires** : solubilité dans l'eau ou dans l'huile, volatilité, toxicité
- Large adoption par de très nombreux secteurs industriels. Une interdiction totale trop rapide des polymères poserait de nombreux problèmes : **substitution difficile**, et souvent même impossible, à **performance identique**
- **Mais tous les PFAS sont persistants dans l'environnement, et il existe peu de traitements efficaces de dégradation**

# Définition et problématique des PFAS identifiés

Plus de **10 000 composés** PFAS identifiés qui diffèrent par :

- **État physique** : gaz, liquides, solides
- **Structure chimique** : chaînes linéaires ou ramifiées, groupes fonctionnels variés (sulfonates, carboxylates, etc.)
- **Propriétés** impactantes : solubilité (eau ou huile), volatilité, (non)biodégradabilité, toxicité, bioaccumulation
- **Usages** : industrie, médical, énergie, transport, électronique, pharma/agro, aéronautique et spatial, ...

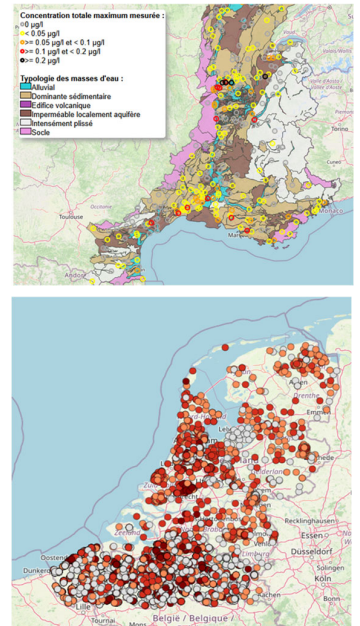
**Les approches réglementaires et toxicologiques doivent être différenciées selon la structure, la fonction, le devenir environnemental et les risques sanitaires**



## Contexte: PFAS, des « polluants Éternels »

- Une crise mondiale et une prise de conscience des autorités à différents niveaux
- La France pas épargnée: nécessité de restrictions d'usage ou de consommation d'eau prises par les préfetures à cause des dépassements de seuils de potabilité (16 communes Ardennes et Meuse, Juillet 2025 – Rumilly Hte Savoie : 2 ressources eau déconnectées du réseau – Alerte sud Lyon...)

*Exemples de contamination des sols ou nappes en vallée du Rhône au Benelux : le problème est global*

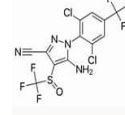
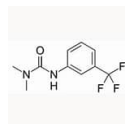
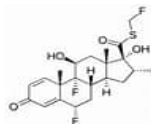
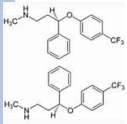


## Applications et usages des PFAS

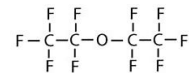
- Il y en a partout et il est en général difficile de s'en passer :
- **santé humaine et animale, produits agrochimiques** : de nombreuses molécules actives avec groupements fluorés, et PFAS persistants dans l'environnement
- **cosmétiques, textiles, emballages, mousses anti-incendie, semi-conducteurs, électrique, électronique, fluidiques, joints, lubrifiants, imperméabilisants,**
- **transports, équipements aériens, aérospatial, militaire, batteries, ...**
- de **l'usage essentiel quasiment impossible à substituer** à moyen terme par des solutions alternatives performantes (liants et séparateurs de batteries, joints, lubrifiants, diélectriques, ..)
- à **l'usage pratique ou plus performant** que d'autres solutions **mais remplaçable ou évitable** (ex : en cosmétique ou dans les peintures).

# Molécules fluorées en pharmacie et agrochimie

- Rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité des médicaments (effets sur la pharmacocinétique et la pharmacodynamique) et des produits agrochimiques (grande stabilité et forte efficacité)
- Stabilité chimique accrue : liaisons fortes fluor - carbone, augmentant la résistance à la dégradation métabolique.
- Lipophilie : Le fluor aide à traverser les membranes cellulaires plus facilement, améliorant ainsi la biodisponibilité.
- Interaction avec les cibles biologiques : En modifiant les propriétés électroniques et stériques, les composés fluorés peuvent avoir une meilleure affinité pour les enzymes et récepteurs.
- 1. Pharmacie : Fluoxétine (Prozac), Ciprofloxacine (antibiotique de la famille des fluoroquinolones), Fluticasone (corticostéroïde - asthme et allergies), Atorvastatine (Lipitor, hypercholestérolémie), Sofosbuvir (antiviral, hépatite C), ...
- 2. Agrochimie : Fluometuron et Fluazifop (herbicides), Fludioxonil (fongicide), Fipronil (insecticide), ..



## Fluoropolymères : Perfluoropolyéthers (PFPEs)



Perfluoropolyether : PFPE

Synthons perfluoro-alkyles reliés par des liaisons éther.

Propriétés : résistance à la température (gamme très large  $-60\text{ °C}$  à  $+250\text{ °C}$ ), très faible dégazage par rapport à d'autres fluides (pression de vapeur de  $6 \times 10^{-8}$  Torr), rigidité diélectrique.

PFPEs chimiquement inertes à de nombreux acides et oxydants (comme l'acide sulfurique fumant (oléum,  $\text{SO}_3$ ), le chlore gazeux, l'oxygène) et aux solvants. Les PFPE sont non toxiques dans des conditions normales, quasiment ininflammables

Applications :

Lubrifiants pour roulements, robinets, joints, quand l'inertie à l'oxygène est clé. Par exemple, les systèmes de carburant et composants mécaniques en aéronautique ; lubrifiants sur les lecteurs de disques d'ordinateur ; systèmes anti-grippage. Agents de démoulage pour l'injection plastique.

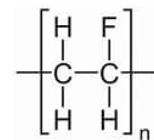
Industrie des semi-conducteurs : PFPEs utilisés comme graisse sous vide, ou dans les équipements de gravure plasma, ou pour les robots utilisés dans la manipulation de wafers de semi-conducteurs

# Fluoropolymères : Fluoroélastomères - FKM

- Copolymères à base de fluorure de vinylidène (VDF - CH<sub>2</sub> CF<sub>2</sub>) :
  - VDF et hexafluoropropylène (HFP) ;
  - VDF et HFP et tétrafluoroéthylène (TFE) ;
  - VDF et TFE et perfluorométhylvinyléther (PMVE) ;
  - VDF et propylène, et TFE ;
  - VDF, HFP, TFE, PMVE et éthylène
- Excellente résistance aux températures élevées (jusqu'à 260 °C), aux fluides agressifs, grande stabilité à des produits variés (huile, diesel, éthanol, fluides corporels, ...)
- Performances exceptionnelles, nombreux domaines d'application vs autres élastomères comme le neoprène : joints, pompes, garnitures, raccords, tubes et tuyaux ... pour raffinage du pétrole, fabrication de semi-conducteurs, alimentation et pharmacie, aviation et aérospatiale, industrie automobile, plongée sous-marine, gants de protection chimique, ...

9

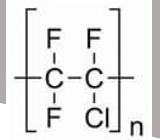
## Fluoropolymères : Fluorure de polyvinylidène (PVDF)



- Pour les applications nécessitant haute pureté, résistance aux solvants, acides, hydrocarbures, .. Non toxicité avérée en dessous de sa température de dégradation.
- Sous forme de tuyaux, feuilles, tubes, films, membranes, mousses .., pour les industries chimique de fabrication, des semi-conducteurs, du médical et de la défense, de l'aérospatial, et dans les batteries lithium-ion ou les supercondensateurs (liant, séparateur), dans le traitement de l'eau (membranes)
- Compatible avec des produits alimentaires (agrée FDA). Additifs dans les peintures haut de gamme pour métaux.

10

## Fluoropolymères : Ethylène-chlorotrifluoroéthylène (ECTFE)



- Forte résistance à la corrosion chimique. Résistant aux acides à des concentrations et températures élevées, aux milieux caustiques, aux agents oxydants et à de nombreux solvants. Large plage de température d'utilisation (-76 °C à +150 °C). Résistance au feu. Résistance à la perméation de petites molécules (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, HF, HBr, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et CH<sub>3</sub>OH). Bonne résistance aux UV.

### ➤ Applications :

- Protection corrosion, dans de multiples industries: papetière (tours de blanchiment), manipulation et stockage d'acides (sulfurique), traitement des gaz de combustion, collecteurs d'électrolyse ou tours de séchage dans l'industrie du chlore, industrie des halogènes (brome, chlore, fluor), applications minières (lixiviation), industrie des semi-conducteurs (lithographie), de la pharmacie,
- Joints d'étanchéité pour le stockage de l'oxygène liquide et propergols pour l'aérospatial.
- Isolant électrique (résistivité élevée, faible constante diélectrique) : gainage de fils et câbles

11

## Fluoropolymères : Polytétrafluoroéthylène (PTFE)



- Propriétés remarquables : résistance aux agressions thermiques ou chimiques, inertie chimique, aux acides très forts (fluoroantimonique, oléum, eau régale, ...), aux bases (soude ou potasse concentrées), aux alcools ou hydrocarbures. Résistance excellente aux UV.
- Comportement élastomérique avec un coefficient de frottement extrêmement faible. Propriétés exceptionnelles : nombre quasi infini d'applications !
  - Roulements, joints, isolation électrique à haute température, revêtements et garnitures non adhésives pour les cuves, ruban d'étanchéité, ...
  - Inerte chimiquement : revêtement de l'intérieur de récipients ou tuyaux contenant des composés chimiques réactifs (p.e. superacides)
  - Revêtement antiadhésif ustensiles de cuisine, lubrifiant solide
  - Tissus et vêtement anti-eau
  - Santé : prothèses
  - Informatique : bases des souris

12

# PTFE : un exemple parmi beaucoup d'autres

- Utilisé dans des centaines d'usage (antiadhésif, hydrophobe, diélectrique, résistance chimique)
  - très stable aux températures d'usage comprises entre -100 °C et +260 °C
  - Le polymère est considéré comme inerte



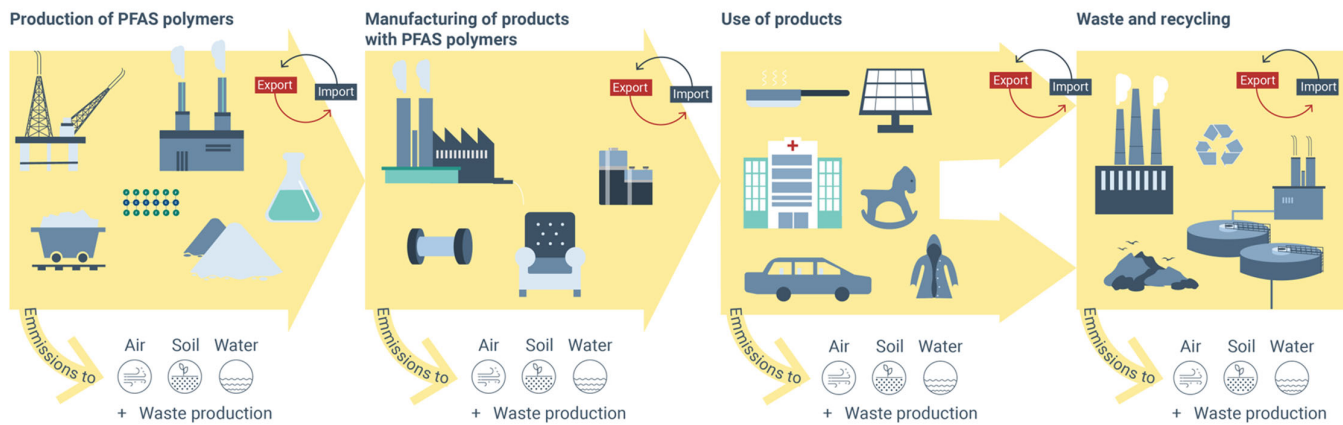
- **Mais**
  - il peut contenir des résidus de synthèse (ex. : PFOA).
  - dégradation thermique à  $t > 300\text{ °C}$ , émission possible d'HF ou de perfluorés volatils. A risque lors de la possible destruction dans les incinérateurs
  - **Illustre un problème transversal : possibilités d'expositions accidentelles et difficulté de la bonne gestion de la fin de vie (collecte, séparation, traitement)**

Filières	Principaux PFAS utilisés (non limitatif)	Fonctions principales
Aéronautique	PFPE, FKM, PVDF, ECTFE	Lubrifiant, ignifugeant, antiadhésif, stabilité thermique, ...
Automobile	PTFE, PFPE, FKM, PVDF	Protection thermique, chimique, résistance mécanique, électrique
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	Emulsifiant, 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
Membranes de filtration	ECTFE, PVDF,	Stabilité chimique, thermique et mécanique, microporosité

Pétrole et activité minière	Polyéthers fluorés, PTFE, PVDF, FKM	Emulsifiant, faible friction, inertie chimique, propriétés diélectrique, résistance thermique,
Peintures, Revêtements ou vernis	PTFE	Adhésion, Résistance à l'abrasion, stabilité chimique et thermique
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

## LES PFAS au long de leur cycle de vie



## LES PFAS au long de leur cycle de vie

- **Production** : utilisation de précurseurs fluorés pour la synthèse de petites molécules ou de polymères
- **Utilisation** : dans les produits industriels (lubrifiants, joints, revêtements, mousses anti-incendie...) ou grand public (cosmétiques, textiles, emballages...)
- **Dispersion** : rejets lors de la fabrication, lixiviation depuis les décharges, volatilisation ou lessivage à l'usage
- **Accumulation** : persistance environnementale, bioaccumulation (faune et l'humain)
- **Fin de vie** : très peu biodégradables. Incinération > 1100 °C, plasmas, traitements chimiques avancés (oxydation supercritique, photo-catalyse).

# Accélérer les solutions:

Supprimer certains usages, bannir les  
molécules toxiques et maîtriser les autres par l'innovation

5

## Des mesures de restriction en définition

- Tous pays : mesures restrictives, parfois focalisées sur les substances les plus problématiques (PFOA, PFOS). Rythme et méthodologie variables
- Europe : restriction très large des molécules et des polymères et de leurs usages dans le cadre de Reach. Chantier énorme pour mise en œuvre de restrictions « raisonnées ». **Enjeux technologiques et financiers colossaux.** Voir <https://echa.europa.eu/nl/-/echa-to-launch-consultation-on-draft-seac-pfas-opinion>
- France :
  - Plan national 2023-2027. Interdictions dans cosmétiques, textiles, farts dès 2026 et textiles /ameublement en 2030
  - Contrôle accru des rejets industriels
  - Cartographie des ICPE identifiées comme sources majeures de PFAS.

Tableau IV : 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
Cosmétiques Produits de soins personnels	PTFE, tensioactifs fluorés	Silicones, cires, biopolymères	En cours	Interdiction logique car usage diffus et usage non indispensable
Cuisine : antiadhésifs	PTFE	Céramiques, fonte, inox	5 ans mini	Substitution par d'autres produits si pertinente. Destruction des produits usagés : filières de récupération, recyclage/destruction
Électronique Semi-conducteurs	PFPE, tensioactifs fluorés, F-polyimides, PVDF	Silicones, hydrocarbures, sulfonic acids	10 à 20 ans selon applications	Destruction thermique des résidus contenant des PFAS après recyclage des métaux.
Gaz réfrigérants	HFC (F-methane, 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.

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 Médical (Appareils ou fournitures, dont textiles)	PFPE ou FKM, PTFE, PVDF	Graphite, MoS2 Difficile	5 ans mini > 10 ans	Substitution 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
Pétrole et minières	activités 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, Mélamine, Polyester,	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> , propane	TFA, > 5 ans	Substitutions par molécules non fluorées, destruction des gaz 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 STEPs municipales
Textiles Imperméabilisation à l'eau et l'huile, antisalissures, textiles, tapis		PTFE	Polyoléfines, cires, acrylates, tensioactifs	En cours < 5 ans	Usage à restreindre puis interdire car non essentiel.

## Stratégie de réduction des risques (1)

- **Communiquer** clairement sur la diversité des PFAS et leurs risques différenciés. Etablir une nouvelle nomenclature différenciant petites molécules et polymères ?
- **Hiérarchiser** les risques pour phaser les interdictions, substitutions et autorisations. Voir <https://echa.europa.eu/nl/-/echa-to-launch-consultation-on-draft-seac-pfas-opinion>
- Garantir la pureté des polymères fluorés et éviter les sous-produits toxiques ou instables : **une fabrication sans émissions environnementales**
- **Renforcer le contrôle des importations pour éviter une** concurrence déloyale de produits contenant des PFAS interdits et protéger notre environnement

## Stratégie de réduction des risques (2)

- Rendre obligatoirement visible la présence de PFAS dans les équipements et produits finis : **marquer, documenter et tracer**
- Assurer la mise en œuvre de **traitements des eaux** validés, mettre en place les traitements nécessaires au niveau des stations de traitement pour éviter tout rejet supplémentaire dans les milieux (eaux, boues d'épandage)
- **Compléter les filières REP existantes pour la collecte, le tri et la destruction des produits PFAS.** Mettre en place des protocoles de collecte et destruction adaptés (haute température, plasma, réacteurs spécialisés) en s'appuyant sur les filières
- **Soutenir fortement la recherche et l'innovation** pour développer des substitutions (technologies ou produits), des procédés écopéformants, des méthodes de détection et des outils de dépollution