



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

État des lieux des sources directes d'émission en PFAS

Rapport final

BRGM/RP-73452-FR

Version 1 du 7 juin 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Cavelan A., Togola A.

Ce rapport a été vérifié le 10/04/2024 et approuvé le 16/05/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : PFAS, Europe, Sources, Émissions.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Cavelan A., Togola A. 2024. État des lieux des sources directes d'émission en PFAS. Rapport final V1. BRGM/RP-73452-FR, 54 p., 3 fig., 9 tab., 2 ann.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Dès la fin des années 1950, de nombreux produits industriels et du quotidien sont fabriqués à partir de substances poly et perfluoroalkylées (PFAS). Ainsi, les PFAS sont présents dans de nombreux secteurs d'activités et de produits de consommation depuis les années 70, expliquant leur présence aujourd'hui dans l'ensemble des compartiments environnementaux. Les substances produites et leurs usages ont évolué avec le temps afin de s'adapter aux changements de la réglementation et de répondre à de nouveaux besoins. Les PFAS regroupent plusieurs milliers de molécules de synthèse, les substances PFAS présentes dans l'environnement peuvent fortement varier selon leur origine, la période à laquelle elles ont été produites, leurs capacités à se transférer vers les différents milieux récepteurs et à évoluer ou s'y dégrader. Distinguer les sources d'émission en PFAS n'est donc pas aisé. Dans ce contexte, les informations en lien avec les signatures chimiques des rejets des activités utilisant et/ou produisant des PFAS et celles des milieux impactés du fait de la dégradation et de la transformation partielle des composés durant leur transfert dans l'environnement ont été synthétisées. Ces informations doivent permettre de mieux cibler les substances à suivre dans les différents milieux environnementaux mais aussi de mieux identifier les sources potentielles d'émission en cas de pollution.

La composition des rejets pourrait être utile en vue d'associer un impact dans l'environnement à une source de pollution en PFAS si sa composition est discriminante. Ce travail montre que les rejets en PFAS sont principalement bien documentés à l'heure actuelle sur sept types d'activités. Parmi elles, citons les industries du textile, du papier et de l'emballage, les industries métallurgiques, la production et l'utilisation des mousses anti-incendie, les industries de la chimie du fluor et les industries cosmétiques et pharmaceutiques. En l'absence de données sur les substances utilisées ou rejetées par les autres secteurs d'activités (électronique, autres industries chimiques : peintures, solvants, polymères, caoutchouc, produits de consommation, électronique, automobile, BTP, etc.), aucune famille de PFAS ou substance PFAS ne peut être spécifiquement associée à leurs rejets à ce jour. Pour les sept sources d'émission documentées, la composition chimique des rejets associés reste difficile à caractériser car la liste des substances utilisées et donc potentiellement rejetées varie au cours du temps en fonction des innovations techniques et de la réglementation (voir exemple de schéma de dégradation sur la Figure 1).

De plus, suite à leur émission dans l'environnement, les substances rejetées vont évoluer, se transformer voire se dégrader. La même substance peut donc être à la fois une substance émise dans le rejet ou un produit de dégradation (Figure 1). Par exemple, étant en bout de chaîne de dégradation de la plupart des substances poly et perfluoroalkylées, les acides carboxyliques perfluoroalkylés (PFCAs) et les acides sulfoniques perfluoroalkylés (PFSA) (dont font partie le PFOS et le PFOA), se retrouvent associés à toutes les activités émettrices de PFAS identifiées, même celles n'utilisant pas ou plus ces substances depuis plus de 20 ans dans leurs procédés industriels (Figure 1). Bien que ces substances soient les plus suivies dans le monde à l'heure actuelle, elles peuvent donc difficilement servir à identifier la source d'émission d'une pollution.

D'autres substances semblent être des indicateurs plus spécifiques de certaines activités, notamment les industries textiles, les industries du papier et de l'emballage, les industries fluorochimiques, et la production ou l'utilisation de mousses anti-incendie. Mais ces substances, dont les usages et les profils de dégradation sont encore assez peu documentés, n'ont pas toutes été utilisées ou produites au même moment, leur présence peut donc varier d'un site à l'autre en fonction des propriétés et mécanismes réactionnels pouvant s'établir dans le milieu et de la période d'usage autorisé pour l'activité qui les a générés.

Ainsi, en l'état actuel des connaissances, une meilleure caractérisation des sources d'émission en PFAS nécessite une meilleure compréhension :

- de l'historique de la fabrication, de l'utilisation et des dates d'interdiction de production et d'utilisation des PFAS dans l'ensemble des secteurs d'activités (les dates d'interdiction n'étant pas toujours claires avec, parfois, l'existence de dérogations pour certains sous usages) ;
- des chemins/mécanismes de dégradation de la plupart des substances fluorées, et notamment des substances émergentes qui ne sont pas documentées ;
- des propriétés physico-chimiques des différentes substances, facteurs conditionnant leur répartition dans les différents compartiments de l'environnement comme le sol et l'eau souterraine voire les gaz.

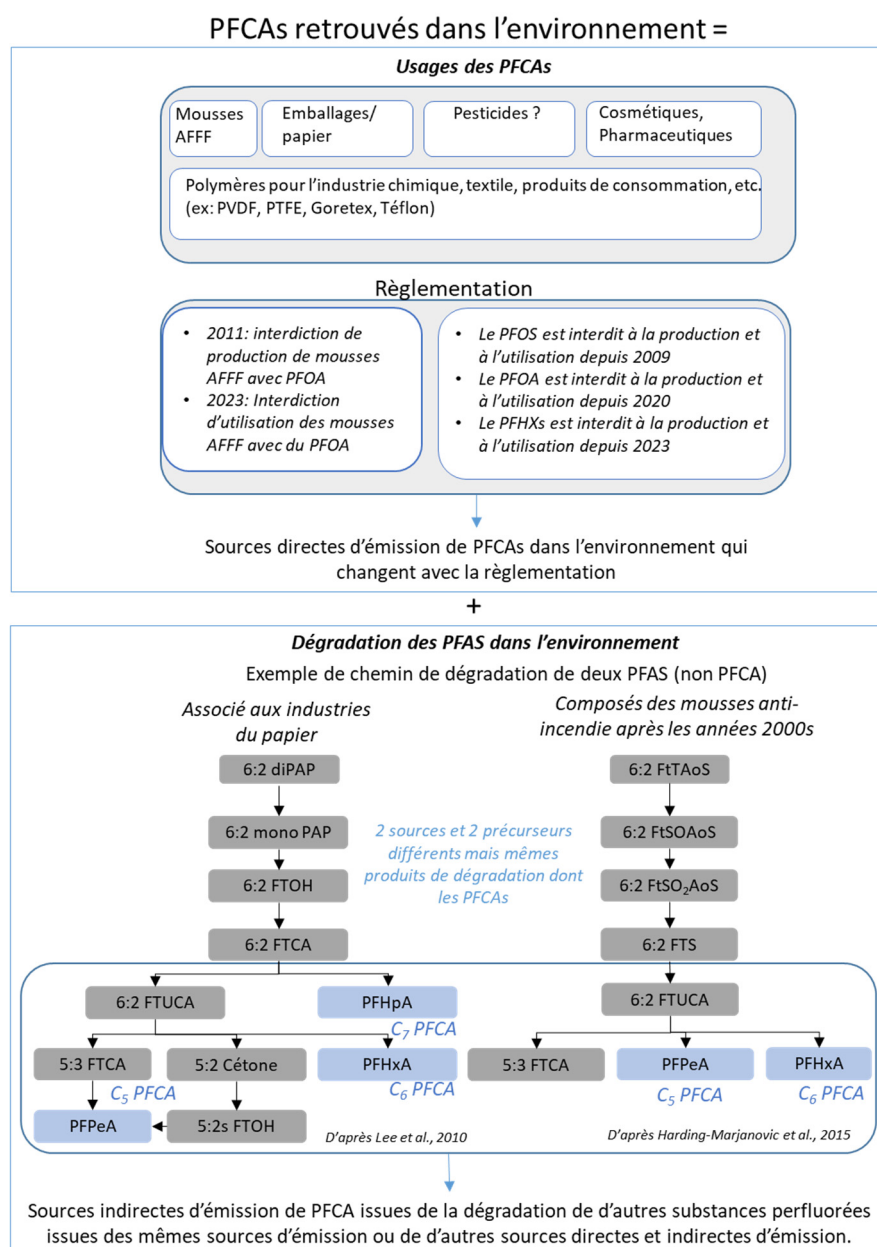


Figure 1 : Schéma expliquant la complexité d'identifier les sources en PFAS : exemple des PFCAs.

Sommaire

1. Contexte	9
2. Identification des sources d'émission en PFAS	11
2.1. PRINCIPAUX USAGES DES PFAS.....	11
2.2. QUELLES SOURCES DOIT-ON CONSIDÉRER ? (SOURCES DIRECTES/ INDIRECTES)	11
3. Sources d'émission en PFAS	13
3.1. INDUSTRIES FLUOROCHIMIQUES (PRODUCTION DES PFAS).....	13
3.2. MOUSSES ANTI-INCENDIE (AFFF).....	16
3.3. INDUSTRIES MÉTALLURGIQUES.....	18
3.4. PAPETERIES ET EMBALLAGES	18
3.5. INDUSTRIES TEXTILES ET TANNERIES.....	19
3.6. INDUSTRIES COSMÉTIQUES, PHARMACEUTIQUES ET PHYTOSANITAIRES	20
3.7. AUTRES SOURCES	21
3.7.1. Autres usages domestiques et industriels	21
3.7.2. Cas des décharges et des STEP (sources indirectes)	22
4. Synthèse et conclusions : peut-on discriminer les sources d'émission directes en PFAS ?	23

Liste des figures

Figure 1 : Schéma expliquant la complexité d'identifier les sources en PFAS : exemple des PFCAs.	4
Figure 2 : Chronologie générale de la production et de la réglementation des PFAS (modifiée d'après ITRC, 2022). En bleu les événements liés aux méthodes de synthèse des PFAS. En vert et jaune les événements liés à une ou plusieurs de famille de PFAS. Les autres couleurs font référence aux événements globaux touchant toute la famille des PFAS.	9
Figure 3 : Sources directes et indirectes d'émission en PFAS.....	12

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux usages des PFAS dans l'industrie.....	11
Tableau 2 : Synthèse des informations sur l'utilisation des PFAS associés aux industries fluorochimiques.	15
Tableau 3 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés à la production et l'utilisation des mousses anti-incendie.....	17
Tableau 4 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS pouvant être associés à l'industrie métallurgique.	18
Tableau 5 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS potentiellement associés aux industries du papier, du carton et de l'emballage.....	19
Tableau 6 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés aux industries du textile.	20
Tableau 7 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés aux industries pharmaceutiques, cosmétiques et la production de pesticides.	21
Tableau 8 : Nombre de PFAS actuellement associés aux sept sources majeures d'émission. Les substances dont la présence est probable sont les substances connues pour faire partie des impuretés ou des profils de dégradation des autres substances identifiées.	23
Tableau 9 : Familles de PFAS retrouvées dans les rejets industriels et/ou utilisées par typologie d'application.....	24

Liste des annexes

Annexe 1 : Liste des substances poly et perfluorées et des sources d'émission auxquelles elles sont actuellement associées	27
Annexe 2 : Profils de biodégradation connus de certains PFAS et précurseurs.....	39

Abréviations

AFFF : Agent formant un film flottant

CI-PFESAs : Acides polyfluoroalcanes éther sulfoniques chlorés

CI-PFUESA : Acides polyfluoroalcanes éther sulfoniques chlorés insaturés

diPAPs : Diesters d'acide polyfluoroalcanes phosphoriques

diSAmPAPs : Diesters de phosphate à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol

ECF : Fluoruration électrochimique

EtFOSA : N-éthyles perfluorooctanes sulfonamides

EtFOSAA : Acides N-éthyles perfluorooctanes sulfonamides acétiques

EtFOSE : N-éthyle perfluorooctanes sulfonamides éthanol

EtFASAAs : Acides N-éthyl perfluoroalcanes sulfonamide acétiques

FASAs : Sulfonamides poly- et perfluoroalkylées

FASEs : Perfluoroalcanes sulfonamides éthanol

FEP : Ethylène-propylène fluoré

FOSA : Perfluorooctane sulfonamide

FOSAA : Acide perfluorooctane sulfonamide acétique

FTs : Fluorotélomères

FTS : Fluorotélomères sulfonates

FTACs : Fluorotélomères acrylates

FTIs : Fluorotélomères iodés

FTABs : Fluorotélomères acrylates bétaïnes

FTALs : Aldéhydes fluorotélomères saturés

FtTAoS : Fluorotélomères thioéther amido-sulfonates

FTMACs : Fluorotélomères méthacrylates

FTMAPs : Fluorotélomères esters de phosphate mercaptoalcanes

FTO : Fluorotélomères d'oléfines

FTOHs : : Fluorotélomères d'alcools

FTSAm : Fluorotélomères sulfonamides

FTUCAs : Acides carboxyliques fluorotélomères insaturés

FTUALs : Aldéhydes fluorotélomères insaturés

NMeFOSE : N-méthyl perfluorooctanes sulfonamides éthanol

MeFASAAs : Acides n-méthyl perfluoroalcanes sulfonamide acétiques

PAP : Monoester de phosphate de fluorotélomère

PFA : Perfluoroalkoxy (Teflon-PFA)

PFAS : Substances poly- et perfluoroalkylées

PFBS : Acide Perfluorobutane Sulfonique
PFCAs : Acides carboxyliques perfluoroalkylés
PFECAs : Perfluoroalcanes-éther-carboxyliques
PFHxS : Acide perfluorohexane sulfonique
PFOA : Acide perfluorooctanoïque
PFOS : Acide sulfonique perfluorooctane
PFOSi : Acide perfluorobutane sulfonique
PFNA : Acide Perfluorononanonique
PFSAs : Acides sulfoniques perfluoroalkylés
PFUnDA : Acide perfluoroundécanoïque
PFO2HxA : Acide perfluoro-3,5-dioxaheptanoïque
PFO3OA : Acide perfluoro 3,5,7-trioxaoctanoïque
PFPeA : Acide perfluoropentanoïque
PFPrOPrA : Acide perfluoro-2-propoxypropanoïque
PTFE : Polyfluoroéthylène
PFESAs : Acides polyfluoroalcanes éther sulfoniques
PFHxA : Acide undécafluorohexanoïque
PFPiAs : Phosphinates perfluoroalcanes
PFTriD : Acide perfluorotridécanoïque
PFUESA : Acides polyfluoroalcanes éther sulfoniques insaturés
PFS : Polymères fluorés à chaîne latérale
POCF : Fluorure de perfluorooctane carbonyle
POSF : Fluorure de perfluorooctane sulfone (Perfluorooctane sulfone fluoride)
PTFE : Polytétrafluoroéthylène
PVDF : Polyfluorure de vinylidène
SAmpPAPs : Phosphates à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol
STEP : Station d'épuration des eaux usées
TriSAmpPAPs : Triester de phosphates à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol

1. Contexte

La dénomination PFAS regroupe plus de 12 000 composés de synthèse produits depuis les années 1930 (Figure 2, ITRC, 2022). Dès la fin des années 1950, de nombreux produits industriels et du quotidien contiennent des PFAS en raison de leurs propriétés physiques et chimiques particulières : résistance à l'eau, aux huiles, stabilité thermique et chimique, propriétés de réduction de la friction (Garg *et al.*, 2020; ITRC, 2022). En conséquence, les PFAS sont présents dans de nombreux secteurs d'activités et une multitude de produits de consommation qui terminent leur vie dans les centres de traitement des déchets et les stations d'épuration (eaux et boues). Les études disponibles montrent que toutes ces activités, ont été, et sont encore d'importantes sources d'émission de PFAS dans l'environnement.

Les substances produites et leurs usages ont évolué afin de s'adapter aux changements de la réglementation (interdiction de certaines substances dès 2009 par le règlement sur les polluants organiques persistants de la convention de Stockholm, Figure 2).

Temps (années)	1930s	1940s	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Principales étapes	Découverte et première production du polyfluoroéthylène (PTFE) Fabrication et production commerciale des PFAS 2009 : Interdiction du PFOS* 2020 Interdiction du PFOA** 2023 Interdiction du PFHxS ***									
Processus et substances produites	Production de PFAS par fluoration électrochimique (ECF) Production de fluoropolymères par fluoro-télomérisation Production de Fluorure de Perfluorooctane sulfonyle (PFOS) Production d'Acide Perfluorooctanoïque (PFOA) Production d'Acide Perfluorononanoïque (PFNA) Production de carboxylates d'alkyles perfluorés de C4 à C14 (PFCAs) Production de précurseurs de PFOS : sulfonamides de perfluorooctane et sulfonamides éthanols (FASAs, FASEs) Production de PFECAs, PFESAs, CI-PFESA									

* La production et l'utilisation du PFOS sont restreints depuis 2009 dans le monde**. Le PFOA est interdit à l'import, l'export et à la production, depuis 2020 dans le monde et interdit à l'utilisation en Europe***. Le PFHxS est interdit à la production et à l'utilisation depuis 2023.

Figure 2 : Chronologie générale de la production et de la réglementation des PFAS (modifiée d'après ITRC, 2022). En bleu les événements liés aux méthodes de synthèse des PFAS. En vert et jaune, les événements liés à une ou plusieurs familles de PFAS. Les autres couleurs font référence aux événements globaux touchant toute la famille des PFAS.

Cependant, bien que les PFAS soient des produits synthétisés par l'être humain (ils n'existent pas à l'état naturel) et que certaines substances soient interdites (ex PFOS, PFOA, PFHxS), les PFAS sont présents de manière ubiquiste, dans tous les compartiments environnementaux (air, sol, eau et sédiments) et même les êtres vivants. Distinguer les sources d'émission n'est donc pas aisé (Gaines, 2023; Garg *et al.*, 2020; Glüge *et al.*, 2020). Étant donné que les PFAS regroupent des milliers de molécules de synthèse, le type de PFAS présent dans l'environnement dépend de leur origine (période et type d'activité génératrice), mais aussi des milieux récepteurs considérés (ex : eaux souterraines, superficielles).

Dans ce contexte, et sur la base d'un travail bibliographique, cet état des lieux a pour but de caractériser les substances utilisées et rejetées par les différentes activités émettrices de PFAS afin de dresser le profil chimique de leurs rejets. L'objectif est de collecter les informations qui pourraient permettre de mieux cibler les substances à suivre dans les différents milieux mais aussi de mieux discriminer les sources d'émission en PFAS dans l'environnement. Ce travail fait un état de l'art des données publiées avant janvier 2024.

2. Identification des sources d'émission en PFAS

2.1. PRINCIPAUX USAGES DES PFAS

À ce jour, les données disponibles permettent de référencer environ 200 utilisations des PFAS à travers 25 secteurs d'activités et pour plus d'une soixantaine d'applications diverses dans le monde (Tableau 1, Gaines, 2023; Glüge *et al.*, 2020).

Tableau 1 : Principaux usages des PFAS dans l'industrie.

Secteurs qui utilisent des PFAS	Usages
Aéronautique, automobile	Lubrifiants, fluides hydrauliques, traitement des tissus intérieurs, revêtement antiadhésifs, peinture, tuyaux moteurs.
Agroalimentaire, emballage/papier	Fabrication d'emballage anti-huile et anti-graisse, de films alimentaires, de papiers résultants à l'eau et à l'usure, de papiers et plaques d'impression pour la réduction de l'électricité statique, de la tension superficielle et des frottements, papiers peints.
Sidérurgie	Agents mouillants et antibrouillards, revêtements d'écran ignifuges, agents pour la gravure.
BTP/matériaux de construction	Revêtements intérieurs et extérieurs résistants aux intempéries, traitement du bois, vitres traitées, ciments, filtres à air, bardages, volets, portes, revêtement de toitures, de sols, de bardages métalliques.
Chimie	Processus de polymérisation, intermédiaires dans la synthèse de composés chimiques. Matières premières pour peintures/adhésifs, solvants, colles, lubrifiants et vernis, fluides hydrauliques. Équipements et instruments de laboratoire (flacons, matériel d'analyse résistants aux solvants). Mousses pour la lutte contre les incendies.
Électronique, énergie/nucléaire	Retardateurs de flamme, gaines anti-intempéries pour les fils électriques et les métaux, manchons de soudure, cellules photovoltaïques, revêtement anti-salissures pour films photo lithographiques, systèmes réfrigérants dans tous types d'appareils électroniques et de batteries.
Pharmaceutique, cosmétique	Régulateurs de croissance des plantes, appâts anti-fourmis, pesticides, produits nettoyants. Émulsifiants et régulateurs de viscosité dans les fonds de teints, crèmes, rouges à lèvres, shampoings, dentifrices, eyeliners, mascaras, poudres de maquillage, crèmes solaires, médicaments.
Plastique, caoutchouc	Production de polymères plastiques (PTFE, PVDF, etc.), gaines anti-intempéries, joints, tubes et tuyaux, matières isolantes. Bandes transporteuses en tissu de verre enduites.
Textile/habillement	Fabrication de vêtements et textiles imperméables, anti salissures et résistants à la chaleur ou aux produits chimiques (équipements de protection, vêtements de sport, ou d'extérieur). Tissus imprégnés de PTFE. Tissus pour l'automobile. Tissus d'intérieurs et d'extérieurs divers.
Autres	Produits de consommation variés (ex : revêtement pour les ustensiles de cuisine). Armement. Instruments de musique.

2.2. QUELLES SOURCES DOIT-ON CONSIDÉRER ? (SOURCES DIRECTES/ INDIRECTES)

Les sources d'émission de PFAS sont souvent divisées en sources directes et indirectes d'émission (Figure 3). Les rejets liés à la production industrielle des PFAS ou à l'utilisation des PFAS dans les processus industriels secondaires pour l'amélioration des performances de différents produits (galvanisation des métaux, revêtement des textiles, traitements du papier, peintures, production de matériaux semi-conducteurs, utilisation de mousses anti-incendie) sont considérés comme des sources directes d'émission. En revanche, les rejets diffus dans l'eau ou les sols issus de l'utilisation et de l'usure quotidienne des produits qui contiennent des PFAS (usure des textiles, des produits de consommation et utilisation de produits cosmétiques contenant des PFAS etc.), les rejets causés par la dégradation lors du stockage et l'élimination dans les décharges et les boues d'épuration des STEP de produits contenant des PFAS, et les retombées atmosphériques sont considérés comme des sources indirectes d'émission (Dasu *et al.*, 2022; Garg *et al.*, 2020; Glüge *et al.*, 2020). S'il est possible d'établir un profil chimique des sources directes d'émission en fonction des substances utilisées dans les processus industriels,

les impuretés associées et leurs produits de dégradation, ce n'est pas le cas des émissions indirectes. Ces dernières constituent un mélange indissociable de substances issues des différentes sources d'émission et dont les différents profils chimiques peuvent fortement varier d'un site à l'autre selon les usages. C'est pourquoi, seule la discrimination des sources directes d'émission est possible. Dans le cas des décharges, le profil chimique dépendra, par exemple, de l'abondance et de la nature des produits stockés issus des différents secteurs d'activités ; un seul et unique profil chimique ne peut donc être établi. L'état des lieux présenté ci-dessous est donc majoritairement centré autour des sources directes d'émission.

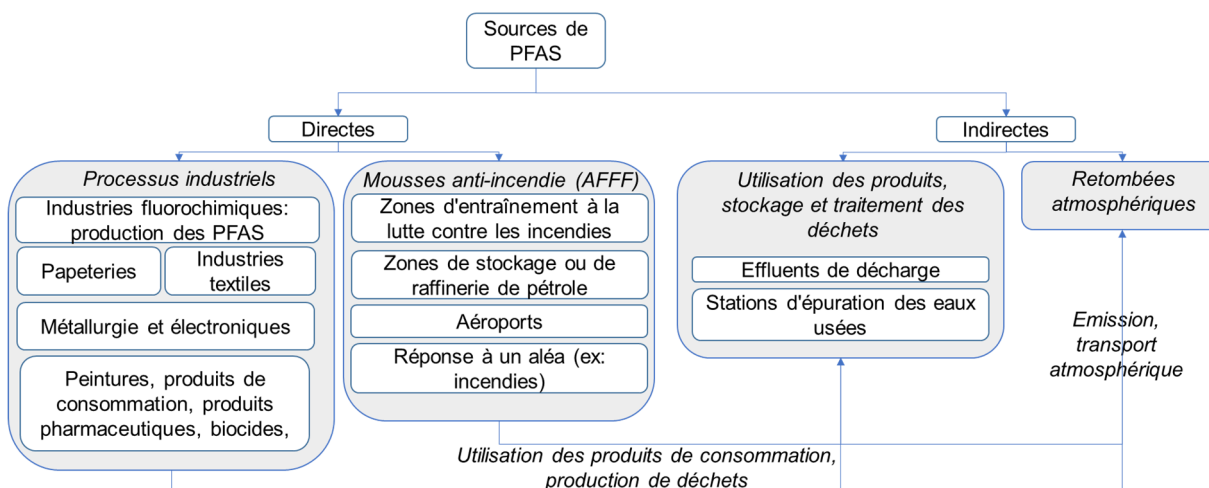


Figure 3 : Sources directes et indirectes d'émission en PFAS.

3. Sources d'émission en PFAS

Ce chapitre fait un état de l'art des substances identifiées dans les processus industriels et les rejets des principales activités émettrices de PFAS afin d'en dresser un profil chimique général. Il est important de noter que les substances identifiées pour chaque source d'émission sont dépendantes des connaissances actuelles. Si une substance n'est pas associée à une activité dans cet état de l'art, cela ne signifie pas forcément que la source n'en produit pas. Toutes les substances impliquées dans les procédés industriels ne sont pas connues. De plus, il se peut que certaines substances pourtant bien présentes n'aient pas encore été recherchées à proximité de certaines sources d'émission en raison du manque de connaissances sur ces substances et des difficultés pour les analyser. Au contraire, des substances ont pu être attribuées à tort à certaines sources en raison du mélange possible de rejets de différentes sources directes et indirectes d'émission se trouvant sur un même secteur. Les informations communiquées ici ne sont donc pas exhaustives et pourront nécessiter des mises à jour en fonction de l'évolution future des connaissances.

3.1. INDUSTRIES FLUOROCHIMIQUES (PRODUCTION DES PFAS)

Plusieurs procédés majeurs ont permis la synthèse des PFAS contenant des chaînes perfluoroalkyles : la fluoration électrochimique (ECF) des années 1940 aux années 2000 et la fluorotélomérisation des années 1970 à aujourd'hui (Figure 2, Tableau 2). En raison des propriétés dangereuses du PFOS et du PFOA et de leur large diffusion à travers le monde, ses principaux fabricants ont progressivement retiré ces composés de la production dès les années 2000 et de nombreux pays ont progressivement interdit ou restreint la production et l'usage des acides sulfoniques perfluoroalkylés (PFSA) et des acides carboxyliques perfluoroalkylés (PFCA) à chaînes longues (Holmquist, 2016; Holmquist *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2014). En Europe, la production et l'utilisation du PFOS, du PFOA, du PFHxS et des produits apparentés ont été progressivement interdits à partir de 2009 (convention de Stockholm) (Figure 2).

Dès lors, d'autres molécules fluorées à chaînes plus courtes, jusqu'alors peu utilisées, ont servi de substituts, et ont vu leurs rejets dans l'environnement augmenter (ITRC, 2022; Pan *et al.*, 2018; Prevedouros *et al.*, 2006; Ruan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2014, 2013). Ces composés incluent, par exemple, les Fluorotélomères Sulfonates (FTS) et les Fluorotélomères Alcools (FTOH) (Tableau 2, Holmquist, 2016; Holmquist *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2014). Cependant, la plupart de ces composés correspond à des « précurseurs » capables de se dégrader en PFOA, PFOS ou en d'autres PFSA et PFCA à chaînes courtes (Tableau A2, Berhanu *et al.*, 2023). Cela a poussé l'émergence de nouvelles substances fluorées à chaînes courtes qui ont été également largement utilisées dans l'industrie depuis dix ans. Parmi ces « nouveaux » PFAS, citons d'une part, les éthers polyfluorés (PFECAs) et leurs dérivés chlorés (Cl-PFECAs) tels que l'ADONA, le HPFO-DA (ou GenX®), le HPFO-TA, le EE4-NH4 et le F53B qui ont progressivement été remplacé le PFOA et le PFNA pour la fabrication des fluoropolymères, et d'autre part, les acides polyfluoroéther sulfoniques (PFESAs) et leur variante chlorée (Cl-PFESAs) utilisés en remplacement du PFOS pour la métallurgie (Munoz *et al.*, 2019). Aucune information n'est disponible à ce jour concernant le procédé de synthèse des PFECAs et des PFESAs. Est-ce par le procédé de fluorotélomérisation¹ ? Cela explique la diversité des composés identifiés dans les différents milieux à proximité de ces industries. L'histoire de la production de PFAS est difficile à décrire avec précision en raison de la confidentialité des processus de production qui ne permet pas toujours d'identifier les substances utilisées et leurs évolutions.

¹ Procédé chimique par lequel les fluorotélomères sont synthétisés.

Le tableau 2 résume les principaux PFAS et précurseurs impliqués dans la production et/ou identifiés dans les rejets des industries fluorochimiques par milieu. Ces composés sont identifiés dans la liste présentée en Annexe de ce rapport (Tableau A1). Ainsi, les substances majoritairement rencontrées à proximité des industries fluorochimiques se composent de l'ensemble des substances utilisées dans la production des substances poly et perfluorées au cours du temps, des impuretés associées, et de leurs produits de dégradation (Tableau 2).

Aujourd'hui, les principaux producteurs de PFAS à travers le monde sont les entreprises CLARIANT, 3M, DUPONT, DAIKIN, CHEMOURS et ASAHI GLASS. En France, différentes entreprises ont produit ou produisent des substances perfluoroalkylées pour les secteurs de l'électronique, de l'automobile, du bâtiment, de la pharmacie ou de l'agrochimie.

Tableau 2 : Synthèse des informations sur l'utilisation des PFAS associés aux industries fluorochimiques.

Procédés de fabrication		Fluorination électrochimique (ECF)			Télomérisation				Non documenté		
Produits sources (monomères)		Fluorure de perfluorooctane sulfonyle (POSF)		Fluorure de perfluorooctane carbonyle (POCF)	Iodure de perfluoroalkyle (PFAIs)				Non documenté		
Produits intermédiaires		/ Perfluorooctanes sulfonamides/sulfonamides éthanols (FASAs)		/	/ Fluorotélomères iodide (FTIs)				Non documenté		
					Fluoro-télomères oléfines (6:2 FTOs)	Acides sulfoniques fluorotélomères (6:2 FTS), Fluorotélomères alcools (6:2 FTOHs)			Non documenté		
Produits finis		PFOS	PFAS non-polymère	Polymères à chaînes latérales fluorées (ex: acrylates)	PFOA	PFOA	PFNA	PFAS non polymères (PFPIA, PFAPA...)	Polymères à chaînes latérales fluorés (ex 6:2 FTAC)	Cl-6:2 PFESA, Cl-8:2 PFESA, C4-C8 PFESA	C4 à C9 PFECAs, C8 à C17 Cl-PFECAs
Utilisations		Surfactant Biocides Traitement de surface, mousses AFFF, Fabrication de PTFE, FEP, PFA, de PVDF Fabrication de PTFE, FEP, PFA Fabrication de PVDF Traitement de surface, mousses AFFF Traitement de surface Surfactant Fabrication de PTFE, FEP, PFA, PVDF									
Composés mesurés	Eaux	PFECAs (PFPrOPrA, PFO2HxA, PFO3OA), C4-C14 PFCAs, C3-C14 PFSA, 6:2 et 8:2 FTMAC, 6:2 et 8:2 FTAC, 6:2, 8:2, 10:2 et 12:2 FTOH, 6:2 FTI, 4:2 et 6:2 FTS, 6:2 FTAB, 6:2 FTA, 6:2, 8:2 FTUCA, 6:2, 8:2 FTCA, C4 PFESA, C4 PFESA, FHxSA									
	Sol/sédiments Air/poussières	C4 à C14 PFCAs et C3 à C14 PFSA, 6:2 FTS, FOSAA, FOSA, MeFOSA, 6:2,8:2, 10:2 FTCA, 6:2, 8:2 FTUCA, C4 PFESA? C4-C14 PFAI C4 à C10 PFCAs et C3 à C14 PFSA, 6:2, 8:2 et 10:2 FTOH, 6:2, 8:2, 10:2 FTUCA, 6:2, 8:2, 10:2 FTCA, FOSA, FOSAA, MeFOSA, FHxSA, C4, C8 PFESA, C4, C8 PFESA, C4 à C14 PFAI									
Caractéristiques spécifiques		Rejets de PFCAs et de PFSA de C4 à C10 linéaires ou ramifiés à chaines paires et distribution centrée sur le PFOA et le PFOS. Augmentation du ratio chaines courtes/chaines longues avec la distance et le temps.				Rejets de PFCAs de C4 à C14 majoritairement linéaires dominés par le PFOA et le PFNA.				Présence de PFESA, PFESA, Cl-PFESA et Cl-PFESA souvent conjointes avec les produits de dégradation des substances produites par ECF et télomérisation avant 2009.	
Références		Bach et al., 2017; Bao et al., 2019; Chai et al., 2017; Chen et al., 2018; Dasu et al., 2022; Dauchy, 2023; Dauchy et al., 2017, 2012a, 2012b; He et al., 2022; Paustenbach et al., 2006; Prevedouros et al., 2006; Ruan et al., 2010; Song et al., 2023; Sun et al., 2016; Wang et al., 2014									

3.2. MOUSSES ANTI-INCENDIE (AFFF)

Les mousses anti-incendie (Aqueous Film Forming Foam, AFFF ou mousses filmogènes aqueuses) forment des mélanges complexes de tensioactifs fluorocarbonés utilisés depuis les années 1960 pour éteindre les incendies de catégorie B (incendies de liquides, ex : huile, kérosène, alcools, acétone, autres combustibles hydrocarbonés non solubles dans l'eau) ou C (incendies de gaz hors gaz liquéfiés). Cette catégorie de mousse est largement utilisée dans les aéroports, les raffineries de pétrole, lors d'interventions d'urgences (type incendie de Lubrizol) mais aussi dans les bases aériennes, navales et militaires pour la formation à la lutte contre les incendies. Suite à leur dispersion, les mousses se déversent directement dans l'environnement (Dasu *et al.*, 2022; Dauchy *et al.*, 2019a; Hale *et al.*, 2017; Høisæter *et al.*, 2019; Prevedouros *et al.*, 2006; Reinikainen *et al.*, 2022). Ainsi, la production et l'utilisation de ces mousses constituent des sources d'émissions directes importantes de PFAS dans l'environnement.

Les mousses anti-incendie qui contiennent des PFOS sont interdites à la vente et à l'utilisation depuis juin 2009. La production des mousses contenant du PFOA est interdite depuis 2011 et la production et l'utilisation du PFOA est interdite depuis 2020 mais l'utilisation de mousse contenant du PFOA est encore autorisée par dérogation jusqu'au 4 juillet 2025. Depuis les années 2010, des mousses sans produits fluorés sont commercialisées pour les remplacer, mais des stocks de mousses AFFF fluorées sont donc toujours utilisées.

Le Tableau 3 fait la synthèse des informations recueillies sur les rejets en PFAS associées à la production et à l'utilisation des mousses anti-incendie. Ainsi, en raison de l'utilisation historique et répétée de ces différentes formulations d'AFFF sur de nombreux sites, l'identification des profils chimiques des PFAS provenant des usages de mousses anti-incendie est souvent complexe (Ahrens *et al.*, 2016; Andraju *et al.*, 2023; Barzen-Hanson *et al.*, 2017; Charbonnet *et al.*, 2021; Langberg *et al.*, 2022; Ruyle *et al.*, 2021; Stults *et al.*, 2023). On retrouve ainsi dans les sols, les sédiments et les eaux, l'ensemble des PFAS présents dans la composition (ou en impuretés) des différentes formulations de mousses utilisées au cours des dernières décennies ainsi que les produits issus de leur dégradation.

En France, plusieurs fabricants de mousses anti-incendie pourraient utiliser ou avoir utilisés des PFAS. Il faut ajouter à ces sites de production l'ensemble des sites où ces mousses ont été utilisées, à savoir, les lieux de service de sauvetage et de lutte contre les incendies, les lieux d'incendies industriels, les aéroports, les sites de stockage ou de raffinerie de pétrole, les ports, les industries pétrochimiques, les sites militaires et potentiellement les zones d'essais des sites SEVESO. Ainsi, on peut estimer que la production et l'usage des mousses anti-incendie en France constituent probablement une source non négligeable de rejets de PFAS dans l'environnement. De plus, ces rejets liés à l'utilisation des mousses s'effectuent directement dans l'environnement, donc sans aucun traitement préalable.

Plus d'informations sur les PFAS associés à l'utilisation des mousses AFFF sont disponibles dans le rapport : Cavelan and Togola, 2024, BRGM/RP-73431-FR.

Tableau 3 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés à la production et l'utilisation des mousses anti-incendie.

Périodes d'utilisation		De 1965 à 1975	De 1970s à 2000s	De 1970s à 2000s	De 1990s à 2010s	De 2000s à 2010s	De 2010s à 2020s
Origine des PFAS		ECF	ECF	Télomérisation	Télomérisation	Télomérisation	Télomérisation ou mousse sans substances fluorées
Exemple de producteurs		3M	3M	Ansul, National Foam,	Angus, Chemguard	Buckeye	Foreade Fire Servie Plus, BioEx*, Eau et Feu*, Vanrullen Uniser*, Profoam international*, Buckeye
PFAS utilisés dans les mousses		C4-C8 PFCAs	C4 à C8 PFSAs et Cl-PFSAs C4 à C7 PFSaAms 4:2, 6:2, 8:2 FTSAS C3 à C8 PFSaAmAs 0,1 et 1 % en masse de C4 à C8 PFCAs (traces)	4:2, 6:2, 8:2 FTS 6:2, 8:2 FTAs, 4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTABs, 4:2, 6:2, 8:2 FtTAoS 6:2 FTAA	6:2, 8:2 FtTHN 6:2 FtTAoS 8:2, 10:2 FTCAs 6:2 FTAA	5:3, 5:1:2, 7:3, 7:1:2; 9:3; 9:1:2 FTB	6:2, 8:2 FTAs 4:2, 6:2, 8:2 FTABs 5:3, 5:1:2, 7:3, 7:1:2; 9:3; 9:1:2 FTBs 4:2, 6:2, 8:2 FTS
Composés mesurés		Eaux Sol/sédiments Air	4:2, 6:2, 8:2 FTS, 4:2, 6:2, 8:2 FtTAoS, C4 à C7 PFSaAm, C4 à C8 PFSaAmA, C3 à C18 PFCA, C4 à C11 PFSA C4 à C16 PFCAs, C4 à C11 PFSAs, 6:2 à 14:2 FtTAoS et FTSAS, C4 à C8 FASA, EtFOSA, MeFOSA, FOSE, MeFOSE, ME MeFHxSE, MeFHpSE, MeFBSE, EtFOSE, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, C4 à C8 Cl-PFSA, 6:2 FTUCA, 6:2, 8:2, 10:2 FTCAs, C4 à C12 PFAl, 6:6, 6:8, 8:8 PFPiA, PFOSi, Capstone 1157®, 6:2 FTAA 4:2, 6:2, 8:2 FTI				
Caractéristiques spécifiques		Augmentation des teneurs en fluorotélomères depuis leur usage en tant que remplaçant du PFOS dans les années 2000s. Mélanges de produits de dégradations issus de toutes les mousses utilisées sur les sites (avec dominance des C4 à C8 PFSAs et PFCAs). Distribution dominée par les C5 à C8 PFCAs et PFSAs dans l'eau. Prédominance de PFOS, de PFHxS, de FOSA, et de 6:2 FTS dans les sédiments.					
Références		Ahrens et al., 2015; Backe et al., 2013; Baduel et al., 2017; Choi et al., 2022; Cook et al., 2022; D'Agostino and Mabury, 2017a, 2017b, 2014; Dasu et al., 2022; Dauchy et al., 2019a, 2019b, 2017; Feng et al., 2023; Filipovic et al., 2015; Hale et al., 2017; Høisæter et al., 2019; Houtz et al., 2016, 2013; Langberg et al., 2021, 2019; Luo et al., 2020; Moody and Field, 2000; Place and Field, 2012; Prevedouros et al., 2006; Reinikainen et al., 2022; Ruan et al., 2010					

*Pas de données sur la composition chimique des mousses produites par ces fabricants

3.3. INDUSTRIES MÉTALLURGIQUES

Les industries métallurgiques ont majoritairement utilisé le PFOS comme suppresseur de brouillard (anti-aérosols) pendant les processus de galvanisation des métaux durs. Depuis le changement de la réglementation concernant le PFOS, le PFBS, puis le 6 :2 FTS et les Cl-PFESAs (Cl-6:2 PFESA appelés aussi F53B) ont majoritairement remplacé le PFOS comme suppresseur de brouillard (Lin et al., 2017). Bien que la production de PFOS soit interdite un peu partout dans le monde depuis 2009, l'utilisation de PFOS et de ses dérivés pour le placage de métaux durs est cependant toujours autorisée sur dérogation dans certains pays. L'industrie métallurgique peut donc s'avérer être encore aujourd'hui une source importante de PFAS. Le Tableau 4 fait la synthèse des informations collectées sur les rejets en PFAS associés à l'industrie métallurgique. Ces rejets se composent principalement des substances utilisées en tant qu'anti-aérosols, mais inclus également leurs impuretés et leurs produits de dégradation.

En France, plusieurs dizaines d'industries sont spécialisées dans le traitement de surface des métaux. Cependant, aucune utilisation de PFAS ne leur est connue à ce jour.

Tableau 4 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS pouvant être associés à l'industrie métallurgique.

Produits utilisés	PFOS et ses dérivés, autre PFASs (impuretés), 6:2 FTS et 6:2 Cl-PFESA (remplacement du PFOS)	
Composés identifiés dans les rejets	Eaux	C ₅ à C ₁₂ PFCAs, C ₄ à C ₁₀ PFASs, Cl-6:2 PFESA, Cl-8:2 PFESA, 1H-6:2 PFESA, 1H-8:2PFESA, 8:2 PFUESA, 4:2, 6:2 et 8:2 FTS.
	Sol/sédiments	C ₄ à C ₁₂ PFCAs, Cl-6:2 PFESA, Cl-8:2 PFESA, 1H-6:2 PFESA, 1H-8:2PFESA, 1H-6:2 PFUESA
	Air	Pas de données
Caractéristiques spécifiques	Présence majoritaire de PFPeA, PFOS, PFHxS, de 6:2 FTS et de 6:2 Cl-PFESA en comparaison de d'autres sources	
Références	Alnehem, 2016; Du et al., 2016; Fath et al., 2016; Lin et al., 2017; Na et al., 2021; Qu et al., 2020; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2016	

3.4. PAPETERIES ET EMBALLAGES

Depuis les années 1940, de nombreuses substances perfluorées ont été ajoutées dans les revêtements de divers matériaux d'emballage (gobelets en papier, cartons, films alimentaires, etc.), des couvertures de livres, des papiers peints, ou encore des encres d'impression pour accroître leur résistance aux tâches et à l'eau (Glüge *et al.*, 2020; Trier *et al.*, 2011). La présence de PFAS dans les emballages peut varier considérablement d'un produit à l'autre.

Identifier la nature et la source des PFAS dans ces matériaux n'est donc pas simple (D'eon *et al.*, 2009; Monge Brenes *et al.*, 2019; Trier *et al.*, 2011). De 1974 à 2002, des PFCAs, des PFASs à chaînes longues (PFOS, PFOA) et de nombreux précurseurs de PFOS ont été utilisés dans les matériaux d'emballage en contact avec les aliments comme le 6 :2 FTS, le 6 :2 FTMAP, le MeFOSE et les esters et diesters phosphatés à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol (SAmPAP et diSAmPAP). Dans les années 2010, les phosphates mono- et di-esters (PAPs, diPAPs) sont à leur tour largement utilisés, comme alternatives fluorées aux PFCAs et PFASs à longue chaîne et leurs dérivés (Benskin *et al.*, 2012a; Trier *et al.*, 2011). L'utilisation de ces composés et leur capacité à se dégrader en PFCAs et PFASs font des industries du papier et de l'emballage, des sources directes potentielles d'émission d'une multitude de substances dans l'environnement. Le Tableau 5 regroupe les informations collectées sur les rejets en PFAS associés aux industries du papier, du carton et de l'emballage. Il s'agit des composés rentrant directement dans la composition des revêtements utilisés et de leurs impuretés et produits de dégradation.

De nombreuses industries du papier et de l'emballage papier et carton sont implantées en France. Mais à ce jour, aucune information n'indique si ces entreprises utilisent ou ont utilisés des PFAS dans leurs procédés de fabrication.

Tableau 5 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS potentiellement associés aux industries du papier, du carton et de l'emballage.

Produits utilisés		Scotchban® (SAmPAP, diSAmPAP, MeFOSE, 4:2, 6:2, 12:2 diPAPs, 6 :2 , 8 :2 TriPAPs), mixture de fluorotélomères (6:2, 10:2 FTMAPs + 4:2, 6:2, 8:2 et 10:2 FTS, et parfois 6 :2 FTOHs), ou mixture de C ₆ à C ₁₄ PFCAs et de 10:2 FTS, Cl-PFHxPA, Cl-PFOPA
Composés mesurés	Eaux	Distribution souvent dominée par le PFOA, le PFOS, le FOSA et l'EtFOSAA accompagnés de plus petites proportions de C ₅ à C ₇ et C ₉ PFCAs, de FASAs, de FOSAA, de 6:2, 8:2 FTCAs, de 6:2, 8:2 FTUCAs, de 6:2 ; 8:2, 10:2 diPAPs et de diSAmPAP
	Sol/sédiments	6:2, 8:2, 10:2, 12:2, 14:2 FTS, 6:2, 8:2, 10:2 FTMAPs, 4:2, 6:2, 12:2 diPAPs, diSAmPAP et triSAmPAP, FOSAA, MeFOSE, EtFOSAA, MeFOSAA, EtFOSA, 6:2, 8:2 FTCAs, 6:2, 8:2 FTUCAs, C ₄ à C ₉ PFSAs et PFCAs.
	Air	Pas de données
Caractéristiques spécifiques		Les FTS, les FASA et les diPAPs, mono et diSAmPAP sont abondants en comparaison de d'autres sources, surtout dans les sédiments. Evolution en fonction de l'historique des usages: la concentration la plus forte en PFOS est généralement en profondeur, les preFOS et le SAmPAPs sont abondants à profondeurs moyennes et les PFCAs et les FTS sont majoritaires dans la partie superficielle.
Références		(Benskin et al., 2012a; Bugsel et al., 2022; Kärman et al., 2011; Langberg et al., 2021; Siao et al., 2022; Zabaleta et al., 2020, 2016)

3.5. INDUSTRIES TEXTILES ET TANNERIES

Dans l'industrie textile, les PFAS sont appliqués comme revêtements hydrofuges, résistants aux taches et à l'huile sur les tissus conçus pour les activités de plein air, les équipements de protection individuelle (EPI) ou pour le mobilier d'extérieur et d'intérieur (Glüge *et al.*, 2020; Gremmel *et al.*, 2016; Janousek *et al.*, 2019; Peaslee *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016; Williams, 2017). Les substances utilisées pour l'imprégnation de ces textiles ont évolué au cours du temps en fonction des industriels et de la réglementation (Tableau 6, Kissa, 2001; Wang *et al.*, 2016).

Les PFAS peuvent être libérés directement lors de la fabrication (via les rejets atmosphériques et les eaux usées), l'utilisation (usure) mais aussi l'élimination du produit textile (industrie du stockage et du traitement des déchets) (Heydebreck *et al.*, 2016; Schellenberger *et al.*, 2022). En effet, les facteurs de contrainte subis par ces textiles durant leur utilisation (changements de température, expositions aux produits chimiques, au soleil, aux précipitations) ainsi que leur lavage répété peut entraîner l'émission diffuse de ces composés chimiques et de leurs produits de transformation dans les sols et l'eau (Berhanu *et al.*, 2023; Heydebreck *et al.*, 2016; Schellenberger *et al.*, 2022; Van Der Veen *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). Le Tableau 6 fait la synthèse des informations collectées sur les rejets en PFAS associés aux industries du textile. Peu de données existent à propos des rejets dans les sols et les sédiments. On y retrouve principalement les produits utilisés comme matériaux primaires ou comme agents dans les revêtements ainsi que leurs produits de dégradation.

Tableau 6 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés aux industries du textile.

Produits utilisés		Avant 2010s	De 1970s à 2020s	Depuis 2010s
		C ₄ , C ₆ , C ₈ PFCAs	6:2, 8:2, 10:2 FTOHs	FOSA, MeFOSA, EtFOSA,
		C ₄ , C ₆ , C ₈ PFSAs	6:2, 8:2 FTS	MeFOSE, EtFOSE,
			6:6, 6:8, 8:8 PFPiAs	6:2, 8:2, 10:2 FTMACs
			6:2, 8:2 10:2 FTACs	C ₄ -C ₁₀ PFAPAs,
Composés mesurés	Eaux	PFOS, C ₄ à C ₁₂ PFCAs, 6:2, 8:2 et 10:2 FTUCAs		
	Sol/sédiments	C ₄ à C ₁₆ PFCAs, PFHxS, PFOS		
	Air	C ₄ à C ₁₄ PFCAs, C ₄ , C ₆ , C ₇ PFSAs, 4 :2, 6 :2, 8:2, 10:2 FTOHs et 12:2 FTOH, 6 :2, 8 :2, 10 :2 FTACs, 6 :2, 8 :2, 10 :2 FTMACs, FOSA, MeFOSA, EtFOSA, MeFOSE, EtFOSE		
Caractéristiques spécifiques		Occurrence forte de PFOA, de PFOS et de PFHxS. Proportion de PFCAs à chaînes courtes (<C ₈) souvent plus élevée que celle des PFCAs à chaînes longues.		
Références		Androulakis et al., 2022; Gremmel et al., 2016; Gu et al., 2021; Heydebreck et al., 2016; Maizel et al., 2023; Mumtaz et al., 2019; Peaslee et al., 2020; Rewerts et al., 2018, 2018; Schellenberger et al., 2022; Sim et al., 2021; Wang et al., 2016; Williams, 2017		

En France, d'anciennes industries textiles ont pu utiliser des PFAS. Cependant, depuis 10 ans, de nombreux producteurs de textiles européens sont progressivement passés à des imprégnations sans PFAS en raison de la pression réglementaire croissante. Dans le but de répondre aux exigences de sécurité, seuls certains producteurs de textiles professionnels (EPI, santé ou lutte contre les incendies) utilisent encore des matériaux fluorés.

3.6. INDUSTRIES COSMÉTIQUES, PHARMACEUTIQUES ET PHYTOSANITAIRES

Les PFAS ont été et sont encore largement utilisés dans la fabrication de cosmétiques, de produits de soin et de produits phytosanitaires. Les analyses faites sur des crèmes solaires, des produits de manucure, des rouges à lèvres, des mascaras, des eyeliners, des poudres, des mousses à raser, des fonds de teint, des crèmes et du shampoing, des dentifrices, des crèmes et poudres dentaires, des pastilles, des comprimés, des médicaments, des biocides, et des gommes à mâcher ont révélé la présence de PFAS dans ces produits (Dasu *et al.*, 2022; Gaines, 2023; Glüge *et al.*, 2020; Harris *et al.*, 2022; Keml, 2015; Pütz *et al.*, 2022). De par leur grande activité de surface, leur stabilité thermique et chimique et leur imperméabilité à l'eau et à l'huile, les PFAS sont souvent utilisés comme émulsifiants, stabilisateurs, surfactants, composés antistatiques, régulateurs de viscosité dans les produits cosmétiques et pharmaceutiques (Peffly *et al.*, 2004). Le Tableau 7 fait la synthèse des informations collectées sur les rejets en PFAS associées à ces industries.

Certaines formulations tendent à minimiser l'utilisation de PFAS mais leur utilisation semble toujours généralisée. Les industries cosmétiques et pharmaceutiques et la production de phytosanitaires peuvent donc être des sources directes d'émission en PFAS auxquels peuvent s'ajouter les rejets indirects dans l'eau et les sols lors de la consommation et l'utilisation de ces produits par leurs usagers. Ces rejets diffus pourraient affecter les profils des PFAS dans les milieux environnementaux. Cependant, à ce jour, peu d'études ont cherché à tracer les émissions de PFAS associés à la production et à l'utilisation des produits cosmétiques, pharmaceutiques et phytosanitaires.

Tableau 7 : Synthèse des informations sur les rejets en PFAS associés aux industries pharmaceutiques, cosmétiques et la production de pesticides.

		Cosmétiques et produits pharmaceutiques	Pesticides
Produits utilisés		C ₄ à C ₁₄ PFCAs	C ₄ à C ₁₀ PFAPAs
		6:2, 8:2 FTOHs	6:6, 6:8, 8:8 PFPiAs
		6:2, 8:2 et 10:2 PAPs	
		6:2, 8:2 FTMACs	6:2/6:2 6:2/8:2, 8:2/8:2 diPAPs
Composés mesurés	Eaux Sol/sédiments Air	Pas de données	
Caractéristiques spécifiques		Pas de données	
Références		(Dasu et al., 2022; Gaines, 2023; Glüge et al., 2020; Harris et al., 2022; Keml, 2015; Pütz et al., 2022; Wang et al., 2016; Whitehead et al., 2021)	

La France compte plusieurs sites de production de produits d'hygiène, de cosmétiques, de produits pharmaceutiques et phytosanitaires. À ce jour, aucune information ne permet de dire si des PFAS ont été ou sont utilisés dans les procédés de fabrication. Cependant certaines molécules phytosanitaires (sulfluramide, fluazinam, flurochloridone, flutianil, isoxaflutole, penthiopyrad, pyroxsulam, tefluthrin, tembotrione, triflurosulfuron methyl) ou vétérinaires (fipronil) sont des PFAS de par leur structure chimique. Le syndicat de l'industrie du médicament et diagnostic vétérinaire (SIMV) a d'ailleurs réagi en 2022 au processus de restriction des PFAS dans le cadre du dispositif européen REACH en précisant que les médicaments vétérinaires peuvent être impactés par ce processus de restriction puisque leur principe actif, certaines substances utilisées dans leur procédé de fabrication et leur emballage sont des PFAS (<https://www.simv.org/actualites/interferences-entre-la-reglementation-reach-et-la-reglementation-europeenne-des>).

3.7. AUTRES SOURCES

3.7.1. Autres usages domestiques et industriels

Les PFAS ont fait, et font l'objet, de bien d'autres usages domestiques et industriels. De multiples autres applications sont effectivement décrites dans les brevets et la littérature (Tableau 1, Gaines, 2023; Glüge *et al.*, 2020; Prevedouros *et al.*, 2006). Aujourd'hui, il est cependant difficile d'estimer les quantités de PFAS utilisées pour ces applications.

Les PFAS identifiés dans ces produits sont majoritairement des PFASs et des PFCAs de 5 à 8 carbones, mais aussi le HPFO-DA, l'ADONA et le PFO₃OA (Bečanová *et al.*, 2016; Jacob *et al.*, 2021; Lee and Mabury, 2017; LLANO, 2015; Wang *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2015). Le PFECHS est utilisé dans les fluides hydrauliques dans l'aéronautique (De Silva *et al.*, 2011). L'origine des PFAS dans ces produits n'est pas toujours claire et peut être liée à un ajout délibéré, à la présence d'impuretés lors de la fabrication, à l'usage de produits secondaires contenant des PFAS, une pollution lors de l'utilisation ou le transport des produits. Ainsi, la majorité des PFAS utilisés pour ces applications se présente sous la forme de polymères à chaînes latérales ou de précurseurs dont les rejets lors de leur production, leur usage quotidien, ou leur traitement en tant que déchets peuvent avoir une signature chimique proche de celles des sources mentionnées précédemment. Il n'est donc pas toujours évident d'identifier l'origine de pollutions aux PFAS dans les zones où ces différentes activités sont exercées.

Ainsi, en France, des PFAS ont pu être, ou pourraient être utilisés dans d'autres secteurs : chimie (solvants, peintures, fluides hydrauliques, colles, vernis), industries du plastique et du caoutchouc, de l'électronique, ou fabrication de produits de consommation.

3.7.2. Cas des décharges et des STEP (sources indirectes)

Les décharges, qui traitent les déchets en vue de leur élimination par enfouissement ou incinération peuvent contenir des déchets provenant de différentes sources mentionnées précédemment qui peuvent libérer des PFAS dans l'environnement lors de leur décomposition (Bolan *et al.*, 2021; Dasu *et al.*, 2022). Il a été démontré que l'élimination de déchets de construction, de démolition, de produits commerciaux, et d'autres déchets contenant des PFAS entraîne la (bio)transformation de certains résidus/précurseurs des PFAS par le clivage des chaînes latérales des polymères fluorés, permettant la libération de PFAS à chaînes courtes (Berhanu *et al.*, 2023; Dasu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2022). La lixiviation de ces décharges peut alors libérer des PFAS et constituer une source indirecte importante pour l'environnement. La présence de PFAS dans les lixiviats de ces décharges a d'ailleurs été mise en évidence un peu partout à travers le monde (Benskin *et al.*, 2012b; Bolan *et al.*, 2021; Busch *et al.*, 2010; Coffin *et al.*, 2022; Dasu *et al.*, 2022; Eggen *et al.*, 2010; Fuertes *et al.*, 2017; Gallen *et al.*, 2017; Hamid *et al.*, 2018; Hepburn *et al.*, 2019; Huset *et al.*, 2011; Knutsen *et al.*, 2019; Lang *et al.*, 2017; Liu and Avendaño, 2013; Masoner *et al.*, 2020). Les composés dominants retrouvés dans ces lixiviats dépendent de l'origine des déchets qui s'y trouvent et de leur temps de stockage (Dasu *et al.*, 2022). Cependant, les PFCAs et PFSA à chaînes courtes ($\leq C_4$), le 5 :3 FTCA, les MeFASAs et EtFASAs produits par la (bio)dégradation de composés à chaînes plus longues sont généralement majoritaires puisqu'ils sont en bout de chaîne de dégradation de la plupart des substances poly et perfluorées connues à ce jour (Tableau A2).

Lors de l'utilisation et la production de nombreux produits de consommation (ex : produits pharmaceutiques, cosmétiques), les PFAS qu'ils contiennent peuvent finir par atteindre les STEP où ils ne sont pas toujours éliminés efficacement. Des PFAS peuvent alors être rejetés indirectement dans l'environnement dans les effluents ou sous forme d'épandages (boues) sur les sols agricoles (Dasu *et al.*, 2022; Hamid and Li, 2016; Venkatesan and Halden, 2013). Sans surprise, le PFOA, le PFNA, le PFOS et les FTSs sont prédominants dans les phases solides et liquides en sortie de STEP, mais les profils dépendent du type d'activité et des usages autour de la STEP (Dasu *et al.*, 2022).

4. Synthèse et conclusions : peut-on discriminer les sources d'émission directes en PFAS ?

Les substances PFAS présentes dans les processus de fabrication sont souvent des informations confidentielles difficiles à obtenir des fabricants. Or, la date d'interdiction de production de certaines substances ne correspond pas toujours à la date à laquelle une industrie a arrêté d'utiliser ces substances ni à la date à laquelle l'utilisation de ces mêmes substances ont été interdites (ex : PFOA, Figure 1). Remonter aux substances utilisées sur site n'est donc pas simple. De plus, chaque PFAS possède des propriétés physico-chimiques variables, ce qui nécessite de prendre en compte le transport et la transformation différentielle de ces composés sur l'évolution de la distribution globale de la signature chimique dans l'espace et le temps. Ainsi, une même source peut aboutir à différents profils chimiques en fonction du milieu échantillonné, de la distance par rapport à la source d'émission (biodégradation des précurseurs, Tableaux 2 à 6, Dasu *et al.*, 2022; Schulz *et al.*, 2020). Mieux connaître les mécanismes de transfert, d'évolution, de dégradation des PFAS et de leurs précurseurs est donc indispensable pour identifier l'origine des sources. La Figure 1 résume cette problématique en prenant l'exemple des PFCAs. Cette figure souligne donc bien que chaque substance est potentiellement à la fois une source de PFAS dans l'environnement et un produit de dégradation provenant d'autres sources. Cet exemple peut être généralisé à d'autres familles de substances poly et perfluorées telles que les PFSAs, les FTCAs, les FTS ou les FTOHs. D'où l'importance pour discriminer les sources de mieux identifier les précurseurs et leurs chemins de dégradation dans l'environnement.

Le Tableau A1 liste en Annexe l'ensemble des PFAS actuellement associés aux différentes sources majeures d'émission directe. Cette liste comprend les substances (PFAS et précurseurs) identifiées par la littérature lors de campagnes de surveillance ou de projets scientifiques (notées « x ») auxquelles ont été ajoutées les substances perfluorées qui n'ont pas été identifiées par ces études (car elles ne figuraient pas dans la liste des substances recherchées) mais dont la présence est probable puisqu'elles font actuellement partie des profils de dégradation ou des impuretés associées aux substances identifiées (notées « (x) »). Les profils de dégradation actuellement documentés sont listés dans le Tableau A2, en Annexe de ce rapport. Les Tableaux 8 et 9 synthétisent ces informations. On peut noter que les profils de dégradation de nombreuses substances ne sont pas encore documentés. Ce travail montre également que seules quelques sources directes d'émission sont suffisamment bien documentées à ce jour.

Tableau 8 : Nombre de PFAS actuellement associés aux sept sources majeures d'émission. Les substances dont la présence est probable sont les substances connues pour faire partie des impuretés ou des profils de dégradation des autres substances identifiées.

	Industries fluorochimiques	Mousses anti- incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Industries cosmétiques et pharmaceutiques	Industries agrochimiques
Substances dont la présence est probable	42	47	42	44	54	47	0
Substances dont la présence est avérée	93	113	76	63	32	25	7
Nombre substances totales associées	135	160	118	107	86	72	7

En l'état actuel des connaissances, certaines familles de PFAS semblent associées à un seul usage (Tableau 9, ex : FTSAmS, FtTHNs, FTBs, FTOs, FTAAs etc.), mais probablement par manque de données car ces substances sont peu connues et donc encore peu recherchées et difficiles à analyser. Au contraire, les familles de substances les plus connues (ex : PFSAs, PFCAs, FTOH, FTS, FASAs...) sont celles qui sont le plus recherchées, on les trouve donc partout. De plus, ces substances bien connues sont aussi utilisées dans tous les secteurs et sont issues de la dégradation de presque toutes les autres familles de substances poly et perfluorées

(Tableau A2). En cas de sources d'émission multiples, ces substances ne peuvent donc pas permettre d'identifier l'activité à l'origine de leur émission. Cependant, la bibliographie disponible et cette synthèse se basent principalement à l'échelle de la famille de substances, alors que certaines substances pourraient être plus spécifiquement liées à un usage que leurs familles. Sur la base de ces résultats, des recherches complémentaires à l'échelle de la substance sont nécessaires sur ces nouvelles familles de composés poly et perfluorés (ex des FTBs, PFSaAms, Cl-PFSAs, FtTHNs, FTMAPs, FTAAAs, PFPAS etc.) afin de mieux comprendre leurs usages dans l'industrie et les autres sources auxquelles elles peuvent être associées.

Tableau 9 : Familles de PFAS retrouvées dans les rejets industriels et/ou utilisées par typologie d'application.

Classes de PFAS	Industries fluorochimiques	Mousses anti- incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Industries cosmétiques et pharmaceutiques	Industries agrochimiques
PFCA	x	x	x	x	x	x	
PFSA	x	x	x	x	x		
Cl-PFSA		x					
PFECA	x						
PFESA	x				x		
Cl-PFECA	x						
Cl-PFESA	x				x		
PFUESA	x				x		
FASA	x	x	x	x			
FASE		x	x	x			
FASAA	x	x	x	x			
FTSAm		x					
FTA	x	x					
FTS	x	x	x	x	x	x	
FTOH	x	x	x	x	x	x	
FTO	x						
FTI	x	x					
FTCA	x	x	x	x	x	x	
FTUCA	x	x	x	x	x	x	
FTAC	x			x		x	
FTMAC	x			x		x	
FTB		x					
FTAB	x	x					
PFSaAm		x					
PFSaAmA		x					
FtTAoS, FtTAoS-SO ₂ , FtTAoS-SO		x					
FtTHN		x					
FTAL	x	x	x	x	x	x	
FTUAL	x	x	x	x	x	x	
FTMAP			x				
FTAA		x					
PFAPA		x		x	x		x
PFPAS			x				
PFAI	x	x					
PFPiA		x		x	x		x
PFSiAs		x	x	x			
PAP, diPAP, triPAP				x		x	
SAmPAP, diSAmPAP, triSAmPAP				x			
	Classes communes à 3 sources ou plus (non discriminantes)						
	Classes communes à 2 sources (discriminantes en association avec d'autres sources)						
	Classes associées à une seule source (discriminantes)						

Ainsi, compte tenu des données disponibles, nous pouvons conclure qu'une meilleure caractérisation des sources d'émission en PFAS et de leurs profils chimiques nécessite de mieux comprendre :

- l'historique de la fabrication, de l'utilisation et des dates d'interdiction de production et d'utilisation des PFAS propres à chaque secteur d'activité (les dates d'interdiction n'étant pas toujours claires avec l'existence de dérogations pour certains sous usages) ;
- les chemins de dégradation de la plupart des substances fluorées, et notamment des substances émergentes qui ne sont pas documentées ;
- les propriétés des différentes substances, facteurs conditionnant leur répartition dans les différents compartiments de l'environnement comme le sol et l'eau souterraine.

Annexe 1

Liste des substances poly et perfluorées et des sources d'émission auxquelles elles sont actuellement associées

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
Trifluoroacétiqueacide	TFA	76-05-1	C ₂ HF ₃ O ₂	114	Acides carboxyliques poly- et perfluorés (PFCA)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
Perfluoropropanoïque acide	PFPrA	422-64-0	C ₃ HF ₅ O ₂	164		(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)	
Perfluorobutanoïque acide	PFBA, HFBA	375-22-4	C ₄ HF ₇ O ₂	214		x	x	x	x	x	x	
Perfluoropentanoïque acide	PFPA, PFPeA	2706-90-3	C ₅ HF ₉ O ₂	264		x	x	x	x	x	x	
Perfluorohexanoïque acide	PFHxA	307-24-4	C ₆ HF ₁₁ O ₂	314		x	x	x	x	x	x	
Perfluoroheptanoïque acide	PFHpA	375-85-9	C ₇ HF ₁₃ O ₂	364		x	x	x	x	x	x	
Perfluorooctanoïque acide	PFOA	335-67-1	C ₈ HF ₁₅ O ₂	414		x	x	x	x	x	x	
Perfluorononanoïque acide	PFNA	375-95-1	C ₉ HF ₁₇ O ₂	464		x	x	x	x	x	x	
Perfluorodecanoïque acide	PFDA; PFDeA	335-76-2	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	514		x	x	x	x	x	x	
Perfluoroundecanoïque acide	PFUnA; PFUnDA	2058-94-8	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	564		x	x	x	x	x	x	
Perfluorododecanoïque acide	PFDoA	307-55-1	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	614		x	x	x	x	x	x	
Perfluorotridecanoïque acide	PFTTrDA; PFTTriA	72629-94-8	C ₁₃ HF ₂₅ O ₂	664		x	x	x	x	x	x	
Perfluorotetradecanoïque acide	PFTeA; PFTeDA	376-06-7	C ₁₄ HF ₂₇ O ₂	714		x	x	x	x	x	x	
Perfluoropentadecanoïque acide	PFPeDA	141074-63-7	C ₁₅ HF ₂₉ O ₂	764		(x)	x	x	(x)	(x)	(x)	
Perfluorohexadecanoïque acide	PFHxDA	67905-19-5	C ₁₆ HF ₃₁ O ₂	813,9		(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)	
Perfluorooctadecanoïque acide	PFOcDA	16517-11-6	C ₁₈ HF ₃₅ O ₂	913,9		(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)	
Trifluoromethane sulfonique acide	TFMS	1493-13-6	CHF ₃ O ₃ S	150	Acides sulfoniques poly et perfluorés (PFSA)							
Perfluoro-3,7-diméthyl acide	PF-3,7-DMOA	172155-07-6	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	514.08								
Perfluorocyclohexanoïque acide	PFCyHxA	374-88-9	C ₇ HF ₁₁ O ₂	326								
7H-Perfluoroheptanoïque acide	7H PFHPA; HPFHpA	1546-95-8	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₂	346								
5H-Perfluoropentanoïque acide	5H PFPA	376-72-7	C ₅ H ₂ F ₈ O ₂	246								
9H-Perfluorononanoïque acide	9H PFNA	76-21-1	C ₉ H ₂ F ₁₆ O ₂	446								
11H-Perfluoroundecanoïque acide	11H PFUnDA	1765-48-6	C ₁₁ H ₂ F ₂₀ O ₂	546								
Perfluoroethane sulfonique acide	PFEtS	354-88-1	C ₂ HF ₅ O ₃ S	200		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)		
Perfluoropropane sulfonique acide	PFPrS	423-41-6	C ₃ HF ₇ O ₃ S	250		x	(x)	(x)	(x)	(x)		
Perfluorobutane sulfonique acide	PFBS	375-73-5	C ₄ HF ₉ O ₃ S	300		x	x	x	x	x		
Perfluoropentane sulfonique acide	PFPeS	2706-91-4	C ₅ HF ₁₁ O ₃ S	349,9		x	x	x	x	x		
Perfluorohexane sulfonique acide	PFHxS	355-46-4	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S	399,9		x	x	x	x	x		
Perfluoroheptane sulfonique acide	PFHpS	375-92-8	C ₇ HF ₁₅ O ₃ S	449,9		x	x	x	x	x		
Perfluorooctane sulfonique acide	PFOS	1763-23-1	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	499,9		x	x	x	x	x		
Perfluorononane sulfonique acide	PFNS	68259-12-1	C ₉ HF ₁₉ O ₃ S	549,9		x	x	x	x	x		
Perfluorodecane sulfonique acide	PFDS, PFDeS	335-77-3	C ₁₀ HF ₂₁ O ₃ S	599,9		x	x	x	x	x		
Perfluoroundecane sulfonique acide	PFUnDS	749786-16-1	C ₁₁ HF ₂₃ O ₃ S	649,9		x	x	x	x	x		
Perfluorododecane sulfonique acide	PFDoS	79780-39-5	C ₁₂ HF ₂₅ O ₃ S	699,9		x	(x)	(x)	(x)	(x)		
Perfluorotridecane sulfonique acide	PFTTrDS	791563-89-8	C ₁₃ HF ₂₇ O ₃ S	749,9		x	(x)	(x)	(x)	(x)		

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agrochimiques
Chloro-Perfluorobutane sulfonique acide (Cl-PFSA)	CL-PFBS		C ₄ HO ₃ SClF ₈	314,9	Acides sulfoniques poly et perfluorés chlorés (Cl-PFSA)		x					
Chloro-Perfluoropentane sulfonique acide	CL-PFPeS		C ₅ HO ₃ SClF ₁₀	364,9			x					
Chloro-Perfluorohexane sulfonique acide	CL-PFHxS		C ₆ HO ₃ SClF ₁₂	414,9			x					
8-Chloroperfluoro-1-octanesulfonique acide	Cl-PFOS	777011-38-8	C ₈ HO ₃ SClF ₁₆	598,9			x					
Hexafluoropropylene oxide dimer acide (Gen X)	HFPO-DA (Gen X), PFPPrOPrA	13252-13-6	C ₆ HF ₁₁ O ₃	330	Acides carboxyliques poly et perfluorés alkyl éthers (PFECA)	x						
Hexafluoropropylene oxyde trimer acide	HFPO-TA, HFPO-TeA	13252-14-7	C ₉ HF ₁₇ O ₄	496		x						
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoïque acide (ADONA)	DONA; ADONA	919005-14-4	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₄	378		x						
Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acétique acide	C ₆ O ₄	1190931-41-9	C ₆ HF ₉ O ₆	340		x						
Perfluoro(3,6-dioxaoctanoïque acide)	EEA	80153-82-8	C ₆ HF ₁₁ O ₄	346		x						
Perfluoro-3-methoxypropanoïque acide	PFMPA PFMOPrA	377-73-1	C ₄ HF ₇ O ₃	230		x						
Perfluoro-3,6-dioxaheptanoïque acide	NFDHA PFDHA	151772-58-6	C ₅ HF ₉ O ₄	296		x						
Perfluoro(4-methoxybutanoïque) acide	PFMBA; PF5OHxA, PFMObA	863090-89-5	C ₅ HF ₉ O ₃	280		x						
Perfluoro-2-methoxyacétique acid	PFMOAA	674-13-5	C ₃ HF ₅ O ₃	180		x						
perfluoro-(3,5-dioxaheptanoïque) acide	PFO2HxA	39492-88-1	C ₄ HF ₇ O ₄	246		x						
perfluoro(3,5,7-trioxaoctanoïque)acide	PFO3OA	39492-89-2	C ₅ HF ₉ O ₅	312		x						
perfluoro(3,5,7,9-tetraoxadecanoïque)acide	PFO4DA	39492-90-5	C ₆ HF ₁₁ O ₆	378		x						
perfluoro-3,5,7,9,11-pentaoxadodecanoïque acide	PFO5DoDA	39492-91-6	C ₇ HF ₁₃ O ₇	444		x						
Methyl 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propionate	HFPO-DA méthyl ester	13140-34-6	C ₇ H ₃ F ₁₁ O ₃	344		x						
Perfluoro(2,5-diméthyl-3,6-dioxanonoïl)fluoride	HFPO-TrA	2641-34-1	C ₉ F ₁₈ O ₃	498,1		x						
Perfluoro-4-ethylcyclohexane sulfonique acide	PFECHS	646-83-3	C ₈ HF ₁₅ O ₃ S	461,9	Acides sulfoniques poly et perfluorés alkyl éthers (PFESA)	x				x		
Perfluoro(2-ethoxyethane)sulfonique acide	PFEESA	113507-82-7	C ₄ HF ₉ O ₄ S	315,9		x				x		
Perfluoro-3,6-dioxa-4-méthyl-7-octenesulfonique acide	PFESA BP 1	29311-67-9	C ₇ HF ₁₃ O ₅ S	443,9		x				x		
6:2 hydrogène-acide) polyfluoroalkyle éther sulfonate	1H-6:2 PFESA					(x)				x		
6:2 hydrogène-substitué polyfluoroalkyle éther sulfonate	2H-6:2 PFESA					(x)				(x)		
8:2 hydrogène-substitué polyfluoroalkyle éther sulfonate	1H-8:2 PFESA					(x)				x		

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agrochimiques
6:2 Insaturé polyfluoroalkyle éther sulfonate	6:2 PFUESA				Acides sulfoniques poly et perfluorés alkyl éthers insaturés (PFUESA)	(x)				(x)		
6 :2 Insaturé hydrogène-acide)	1H-6:2 PFUESA					(x)				(x)		
polyfluoroalkyle éther sulfonate												
8 :2 Insaturé hydrogène»-acide)	1H-8:2 PFUESA					(x)				(x)		
polyfluoroalkyle éther sulfonate												
Chloro-perfluoroethercarboxylate mixture	Cl-PFECA; ADV	329238-24-6			Acides carboxyliques poly et perfluorés alkyl éthers chlorés (Cl-PFECA)	x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 0,1	2-CIPFECA 0,1	948590-83-8	C ₈ HCIF ₁₄ O ₄	461,9		x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 0,2	2-CIPFECA 0,2		C ₁₁ HCIF ₂₀ O ₄	611,9		x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 0,3	2-CIPFECA 0,3		C ₁₄ HCIF ₂₆ O ₄	761,9		x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 0,4	2-CIPFECA 0,4		C ₁₇ HCIF ₃₂ O ₄	911,9		x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 1,1	2-CIPFECA 1,1	2490185-89-0	C ₁₀ HCIF ₁₈ O ₅	577,9		x						
2-Chloro-perfluoroethercarboxylate congénère 1,2	2-CIPFECA 1,2		C ₁₃ HCIF ₂₄ O ₅	727,9		x						
9-chlorohexadecafluoro-3-oxanonane-1-sulfonique acide, F53B	6:2 Cl-PFESA	756426-58-1	C ₈ HCIF ₁₆ O ₄ S	531,9	Acides sulfoniques poly et perfluorés alkyl éthers chlorés (Cl-PFESA)	x				x		
11-chloroeicosafluoro-3-oxaundecane-1-sulfonique acide, F53B	8:2 Cl-PFESA	763051-92-9	C ₁₀ HCIF ₂₀ O ₄ S	631,9		x				x		
Perfluorobutane sulfonamide	FBSA, PFBSA	30334-69-1	C ₄ H ₂ F ₉ NO ₂ S	299	Sulfonamides poly- et perfluoroalkylées (FASA)		x	x	x			
Perfluoropentane sulfonamide	FPeSA	82765-76-2	C ₅ H ₂ F ₁₁ NO ₂ S	349			x	x	x			
Perfluorohexane sulfonamide	FHxSA	41997-13-1	C ₆ H ₂ F ₁₃ NO ₂ S	399		x	x	x	x			
Perfluoroheptane sulfonamide	FHpSA	82765-77-3	C ₇ H ₂ F ₁₅ NO ₂ S	449			x	x	x			
Perfluorooctane sulfonamide	FOSA, PFOSA	754-91-6	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	499		x	x	x	x			
Perfluorodecane sulfonamide	FDSA	4262-70-8	C ₁₀ H ₂ F ₂₁ NO ₂ S	598,9								
N-Méthyl-n-perfluorobutane sulfonamide	MeFBSA	68298-12-4	C ₅ H ₄ F ₉ NO ₂ S	313,1			x	x	x			
N-Méthyl-n-perfluoropentane sulfonamide	MeFPeSA	68298-13-5	C ₆ H ₄ F ₁₁ NO ₂ S	363,1								
N-Méthyl-n-perfluorohexane sulfonamide	MeFHxSA	68259-15-4	C ₇ H ₄ F ₁₃ NO ₂ S	413,2								
N-Méthyl-n-perfluoroheptane sulfonamide,	MeFHpSA	68259-14-3	C ₈ H ₄ F ₁₅ NO ₂ S	463,2				x	x			
N-Méthyl-perfluorooctane sulfonamide	MeFOSA	31506-32-8	C ₉ H ₄ F ₁₇ NO ₂ S	513		x	x	x	x			
N-éthyl-perfluorobutane-1-sulfonamide	EtFBSA	40630-67-9	C ₆ H ₆ F ₉ NO ₂ S	327,2			x	x	x			
N-Ethyle perfluoropentane sulfonamide	EtFPeSA	162682-16-8	C ₇ H ₆ F ₁₁ NO ₂ S	377								
N-Ethyle perfluorohexane sulfonamide	EtFHxSA	87988-56-5	C ₈ H ₆ F ₁₃ NO ₂ S	426,8								
N-Ethyle perfluoroheptane sulfonamide	EtFHpSA	68957-62-0	C ₉ H ₆ F ₁₅ NO ₂ S	476,6								
N-Ethyle-perfluorooctane sulfonamide	EtFOSA	4151-50-2	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	527			x	x	x			
N-Méthyl-n-perfluorobutyle sulfonyle glycine	MeFBSAA	159381-10-9	C ₇ H ₆ F ₉ NO ₄ S	371				x	x			
N,N-Diméthyle-n-perfluorooctane sulfonamide	N-Me ₂ FOSA	213181-78-3	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	527				x	x			

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-1-butane sulfonamide	FBSE	34454-99-4	C ₆ H ₉ NO ₃ S	343,2	Perfluoroalcanes sulfonamides éthanols (FASE)							
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,5-undecafluoro-N-(2-hydroxyéthyle)pentane-1- sulfonamide	FPeSE		C ₇ H ₆ F ₁₁ NO ₃ S	393,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6- tridecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-1- hexane sulfonamide	FHxSE	106443-63-4	C ₈ H ₆ F ₁₃ NO ₃ S	443,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,7-pentadecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-1-heptane sulfonamide	FHpSE	167398-54-1	C ₉ H ₆ F ₁₅ NO ₃ S	493,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptadecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-1-octane sulfonamide	FOSE	10116-92-4	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₃ S	543,2			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-butane sulfonamide	MeFBSE	34454-97-2	C ₇ H ₈ F ₉ NO ₃ S	357,2			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,5-undecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-pentane sulfonamide	MeFPeSE	68555-74-8	C ₈ H ₈ F ₁₁ NO ₃ S	407,2			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-hexane sulfonamide	MeFHxSE	68555-75-9	C ₉ H ₈ F ₁₃ NO ₃ S	457,2			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,7-pentadecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-heptane sulfonamide	MeFHpSE	68555-76-0	C ₁₀ H ₈ F ₁₅ NO ₃ S	507,2			x	x	x			
N-Méthyl-N-(2-hydroxyethyl)perfluorooctane sulfonamide	MeFOSE	24448-09-7	C ₁₁ H ₈ F ₁₇ NO ₃ S	557			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-butane sulfonamide	EtFBSE	34454-97-2	C ₇ H ₈ F ₉ NO ₃ S	357,2			x	x	x			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,5-undecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-pentane sulfonamide	EtFPeSE	68555-74-8	C ₈ H ₈ F ₁₁ NO ₃ S	407,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-hexane sulfonamide	EtFHxSE	68555-75-9	C ₉ H ₈ F ₁₃ NO ₃ S	457,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7- pentadecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyl-1-heptanesulfonamide	EtFHpSE	68555-76-0	C ₁₀ H ₈ F ₁₅ NO ₃ S	507,2								
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- heptadecafluoro-N-(2-hydroxyethyl)-N-methyloctane-1- sulfonamide	EtFOSE	1691-99-2	C ₁₂ H ₁₀ F ₁₇ NO ₃ S	571			x	x	x			
Perfluoro-1-octanesulfonamidoacétiqueacide	FOSAA	2806-24-8	C ₁₀ H ₄ F ₁₇ NO ₄ S	557	Acides acétiques perfluoroalcanes sulfonamides (FASAA)	x	x	x	x			
2-(N-Méthyl perfluorooctane sulfonamide)acétique acide	MeFOSAA	2355-31-9	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ NO ₄ S	571		(x)	x	x	x			
2-(N-Ethyle perfluorooctane sulfonamide)acétique acide	EtFOSAA	2991-50-6	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ NO ₄ S	585		(x)	x	x	x			
1-Propanaminium, N,N-diméthyl-N-oxide-3-[[[(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctyl)sulfonyl] amino]-hydroxyde	DPOSA Capstone 1183A	80475-32-7	C ₁₃ H ₁₇ F ₁₃ N ₂ O ₃ S	528,1	Fluorotélomères sulfonamides (FTSAm)		x					
6:2 Fluorotélomère sulfonamide N,N-diméthyle amine	6:2 FTA	1383438-86-5	C ₁₃ H ₁₈ F ₁₃ N ₂ O ₂ S	513,3	Fluorotélomères sulfonamides amides (FTA, FTSaAm)	x	x					
8:2 Fluorotélomère sulfonamide N,N-diméthyle amine	8:2 FTA					(x)	(x)					

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
1H,1H,2H,2H-perfluorohexanesulfonate	4:2 FTS	757124-72-4	C ₆ H ₅ F ₉ O ₃ S	328	Fluorotélomères sulfonates (FTS)	(x)	x	x	(x)	(x)	(x)	
1H,1H,2H,2H-perfluorooctanesulfonate	6:2 FTS	27619-97-2	C ₈ H ₅ F ₁₃ O ₃ S	428		x	x	x	x	x	x	
1H,1H,2H,2H-perfluorodecane sulfonate	8:2 FTS	39108-34-4	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O ₃ S	528		x	x	x	x	x	x	
1H,1H,2H,2H-perfluorododecane sulfonate	10:2 FTS	120226-60-0	C ₁₂ H ₅ F ₂₁ O ₃ S	628		x	x	x	x	x		
12:2 Fluorotélomère sulfonique acide	12:2 FTS	1034143-66-2	C ₁₃ H ₅ F ₂₃ O ₃ S	678,2		(x)	x	x		(x)	(x)	
14:2 Fluorotélomère sulfonique acide	14:2 FTS	1513864-08-8	C ₂₃ H ₁₈ F ₂₉ NO ₄ S ₂	987,5		(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)	
2-perfluorobutyl éthanol (4:2)	4:2 FTOH; FBET	2043-47-2	C ₆ H ₅ F ₉ O	264	Fluorotélomères d'alcools (FTOH)	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
1-perfluoropentyl éthanol (5:2 s)	5:2sFTOH	914637-05-1	C ₇ H ₅ F ₁₁ O	314		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2-perfluorohexyl éthanol (6:2)	6:2 FTOH; FHET	647-42-7	C ₈ H ₅ F ₁₃ O	364		x	(x)	x	x	(x)	x	
1-perfluoroheptyl éthanol (7:2 s)	7:2sFTOH	24015-83-6	C ₉ H ₅ F ₁₅ O	414		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2-perfluorooctyl éthanol (8:2)	8:2 FTOH FOET	678-39-7	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O	464		x	(x)	x	x	(x)	x	
2-pefluorodecyl éthanol (10:2)	10:2 FTOH ; FDET	865-86-1	C ₁₂ H ₅ F ₂₁ O	564		x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2-perfluorodecyl éthanol (12:2)	12:2 FTOH	39239-77-5	C ₁₄ H ₅ F ₂₅ O	664		x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2-perfluorodecyl éthanol (14:2)	14:2 FTOH	60699-51-6	C ₁₆ H ₅ F ₂₉ O	764		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2,2-difluoropropan-1-ol	2:1 FTOH	33420-52-9	C ₃ H ₆ F ₂ O	96								
2,2,3,3,3-pentafluoropropan-1-ol	1:2 FTOH	2240-88-2	C ₃ H ₃ F ₅ O	114								
3,3,3-trifluoropropan-1-ol	2:1 FTOH	422-05-9	C ₃ H ₃ F ₃ O	150								
1H,1H,2H,2H,3H,3H-Perfluorobutan-1-ol	1:3 FTOH	461-18-7	C ₄ H ₇ F ₃ O	128								
1H,1H-Perfluorobutan-1-ol	3:1 FTOH	375-01-9	C ₄ H ₃ F ₇ O	200								
1H,1H,2H,2H-Perfluorobutan-1-ol	2:2 FTOH	54949-74-5	C ₄ H ₅ F ₅ O	164								
1H,1H,5H-Perfluoropentan-1-ol	5H 4:1 FTOH	355-80-6	C ₅ H ₄ F ₈ O	232		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
1H,1H,2H,2H,3H,3H-Perfluorohexan-1-ol	3:3 FTOH	679-02-7	C ₆ H ₇ F ₇ O	228								
1H,1H-Perfluorohexan-1-ol	5:1 FTOH	423-46-1	C ₆ H ₃ F ₁₁ O	300								
1H,1H,7H-Perfluoroheptan-1-ol	7H 6:1 FTOH	335-99-9	C ₇ H ₄ F ₁₂ O	332								
1H,1H-Perfluoroheptan-1-ol	6:1 FTOH	375-82-6	C ₇ H ₃ F ₁₃ O	350								
1H,1H,8H-Perfluorooctan-1-ol	8H 7:1 FTOH	10331-08-5	C ₈ H ₄ F ₁₄ O	382								
1H,1H-Perfluorooctan-1-ol	7:1 FTOH	307-30-2	C ₈ H ₃ F ₁₅ O	400		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
1H,1H,2H,2H,3H,3H-Perfluorononan-1-ol	6:3 FTOH	80806-68-4	C ₉ H ₇ F ₁₃ O	378								
1H,1H,2H,2H-Perfluoro-7-methyloctan-1-ol	7Me 6:1 FTOH	20015-46-7	C ₉ H ₅ F ₁₅ O	414								
1H,1H,9H-Perfluorononan-1-ol	9H 8:1 FTOH	376-18-1	C ₉ H ₄ F ₁₆ O	432								
1H,1H-Perfluorononan-1-ol	8:1 FTOH	423-56-3	C ₉ H ₃ F ₁₇ O	450								
1H,1H,10H,10H-Perfluoro-1,10-decanediol	1:8:1 FTdiOH	754-96-1	C ₁₀ H ₆ F ₁₆ O ₂	462								
1H,1H-Perfluorodecan-1-ol	9:1 FTOH	307-37-9	C ₁₀ H ₃ F ₁₉ O	500								
1H,1H-Perfluoro-3,7-dimethyloctan-1-ol	3,7-DiMe 7:1 FTOH	232587-50-7	C ₁₀ H ₃ F ₁₉ O	500								
1H,1H,2H,2H-Perfluoro-9-methyldecan-1-ol	9Me 8:2 FTOH	31200-98-3	C ₁₁ H ₅ F ₁₉ O	514								
1H,1H,11H-Perfluoroundecan-1-ol	11H 10:1 FTOH	307-70-0	C ₁₁ H ₄ F ₂₀ O	532								
1H,1H-Perfluoroundecan-1-ol	10:1 FTOH	307-46-0	C ₁₁ H ₃ F ₂₁ O	550								
1H,1H,13H-Perfluorotridecan-1-ol	13H 12:1 FTOH	423-72-3	C ₁₃ H ₄ F ₂₄ O	632								
1H,1H-Perfluorotetradecan-1-ol	13:1 FTOH	15622-57-8	C ₁₄ H ₃ F ₂₇ O	700								
1H,1H-Perfluorohexadecan-1-ol	15:1 FTOH	216144-94-4	C ₁₆ H ₃ F ₃₁ O	800								
1H,1H-Perfluorooctadecan-1-ol	17:1 FTOH	242142-82-1	C ₁₈ H ₃ F ₃₅ O	900								

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
4:2 Fluorotélomère oléfine	4 :2 FTO	19430-93-4	C ₆ F ₉ H ₃	246,1	Fluorotélomères d'oléfines (FTO)	x						
6:2 Fluorotélomère oléfine	6 :2 FTO	25291-17-2	C ₈ F ₁₃ H ₃	346,1		x						
8:2 Fluorotélomère oléfine	8 :2 FTO	21652-58-4	C ₁₀ F ₁₇ H ₃	446,1		x						
10:2 Fluorotélomère oléfine	10 :2 FTO	30389-25-4	C ₁₂ F ₂₁ H ₃	546,1		x						
12:2 Fluorotélomère oléfine	12 :2 FTO	67103-05-3	C ₁₄ F ₂₅ H ₃	646,1		x						
4:2 Fluorotélomère iodide	4:2 FTI	2043-55-2	C ₆ H ₄ F ₉ I	373,9	Fluorotélomères d'iodures (FTI)	x	x					
6:2 Fluorotélomère iodide	6:2 FTI	2043-57-4	C ₈ H ₄ F ₁₃ I	473,9		x	x					
8:2 fluorotélomère iodide	8:2 FTI	2043-53-0	C ₁₀ H ₄ F ₁₇ I	573,9		x	x					
10:2 fluorotélomère iodide	10:2 FTI	2043-54-1	C ₁₂ H ₄ F ₂₁ I	673,9		x	(x)					
3,3,4,4,5,5,6,6,6-nonafluoro-hexanoïque acide	4:2 FTCA	70887-89-7	C ₆ H ₃ F ₉ O ₂	278	Fluorotélomères d'acides carboxyliques (FTCA)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- tridecafluorooctanoïque acide	6:2 FTCA	53826-12-3	C ₈ H ₃ F ₁₃ O ₂	378		x	x	x	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10- heptadecafluorodécanoïque acide	8:2 FTCA	27854-31-5	C ₁₀ H ₃ F ₁₇ O ₂	478		x	x	x	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11, 11,12,12,12- hénicosafluorodécanoïque acide	10:2 FTCA	53826-13-4	C ₁₂ H ₃ F ₂₁ O ₂	578		x	x	x	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11, 11,12,12,13,13,14,14,14- pentacosafuorotétradécanoïque acide	12:2 FTCA	70887-93-3	C ₁₄ H ₃ F ₂₅ O ₂	678		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2H,2H,3H,3H-Perfluorohexanoïque acide	3:3 FTCA	356-02-5	C ₆ H ₃ F ₇ O ₂	242		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2H,2H,3H,3H-Perfluorooctanoïque acide	5:3 FTCA	914637-49-3	C ₈ H ₃ F ₁₁ O ₂	342		(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)	
2H,2H,3H,3H-Perfluorononanoïque acide	6:3 FTCA	27854-30-4	C ₉ H ₃ F ₁₃ O ₂	392		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2H,2H,3H,3H-Perfluorodécanoïque acide	7:3 FTCA	812-70-4	C ₁₀ H ₃ F ₁₅ O ₂	442		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2H,2H,3H,3H-Perfluoroundécanoïque acide	8:3 FTCA	34598-33-9	C ₁₁ H ₃ F ₁₇ O ₂	492		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,4,4,5,5,6,6,6-octafluorohex-2-énoïque acide	4:2 FTUCA	70887-90-0	C ₆ H ₂ F ₈ O ₂	258	Fluorotélomères d'acides carboxyliques insaturés (FTUCA)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
(2E)-4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Undecafluorooct-2-énoïque acide	5:3 FTUCA	875878-70-9	C ₈ H ₃ F ₁₁ O ₂	340,1		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-dodecafluorooct-2-énoïque acide	6:2 FTUCA	70887-88-6	C ₈ H ₂ F ₁₂ O ₂	358		x	x	x	x	(x)	(x)	
3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10- hexadecafluorodéc-2-énoïque acide	8:2 FTUCA	70887-84-2	C ₁₀ H ₂ F ₁₆ O ₂	458		x	(x)	x	x	(x)	(x)	
3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11, 11,12,12,12- icosafuorodéc-2-énoïque acide	10:2 FTUCA	70887-94-4	C ₁₂ H ₂ F ₂₀ O ₂	558		x	(x)	(x)	x	(x)	(x)	
3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14,14 - tétracosafuorotétradéc-2-énoïque acide	12:2 FTUCA	70887-95-5	C ₁₄ H ₂ F ₂₄ O ₂	658		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
2H,3H-Perfluoro-2-hénoïque acide	3:3 FTUCA	37759-76-5	C ₆ H ₃ F ₇ O ₂	240		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
1H,1H,2H,2H-Perfluorooctyl acrylate	6:2 FTAC	17527-29-6	C ₁₁ H ₇ F ₁₃ O ₂	418	Fluorotélomères acrylates (FTAC)	x			x		x	
1H,1H,2H,2H-perfluorodécyl acrylate	8:2 FTAC	27905-45-9	C ₁₃ H ₇ F ₁₇ O ₂	518		x			x		x	
1H,1H,2H,2H-perfluorododécyl acrylate	10:2 FTAC	17741-60-5	C ₁₅ H ₇ F ₂₁ O ₂	618		x			x		(x)	
1H,1H,2H,2H-Perfluoro-n-octyl méthacrylate	6:2 FTMAC	2144-53-8	C ₁₂ H ₉ F ₁₃ O ₂	432	Fluorotélomères méthacrylates (FTMAC)	x			x		x	
1H,1H,2H,2H-Perfluoro-n-décyl méthacrylate	8:2 FTMAC	1996-88-9	C ₁₄ H ₉ F ₁₇ O ₂	532		x			x		x	
1H,1H,2H,2H-Perfluoro-n-dodécyl méthacrylate	10:2 FTMAC	2144-54-9	C ₁₆ H ₉ F ₂₁ O ₂	632		x			x		(x)	
1H,1H,2H,2H-perfluorodécyl acétate	8:2 FTOAc	37858-04-1	C ₁₂ H ₇ F ₁₇ O ₂	506	Fluorotélomères acétates (FTOAc)							
1H,1H,2H,2H-perfluorododécyl acétate	10:2 FTOAc	37858-05-2	C ₁₄ H ₇ F ₂₁ O ₂	606								

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agrochimiques
2-[(4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Undecafluorooctyl)diméthyl-ammonio]acetate	5:3FTB	171184-14-8	C ₁₂ H ₁₄ F ₁₁ NO ₂	413,1	Fluorotélomères bétaines (FTB)		x					
2-[(3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Dodecafluorooctyl)diméthyle-ammonio]acétate	5:1:2FTB	145441-31-2	C ₁₂ H ₁₃ F ₁₂ NO ₂	431,2			x					
N-(carboxyméthyle)-1H,1H,2H,2H,3H,3H -N,N-diméthylperfluorodecan-1-aminium	7:3 FTB	171184-04-6	C ₁₄ H ₁₄ F ₁₅ NO ₂	513,2			x					
N-(carboxyméthyle)-1H,1H,2H,2H,3H -N,N-diméthylperfluorodecan-1-aminium	7:1:2 FTB	171184-03-5	C ₁₄ H ₁₃ F ₁₆ NO ₂	531,2			x					
N-(carboxyméthyle)-1H,1H,2H,2H,3H,3H -N,N-diméthylperfluorododecan-1-aminium	9:3 FTB	171184-16-0	C ₁₆ H ₁₄ F ₁₉ NO ₂	613,3			x					
N-(carboxyméthyle)-1H,1H,2H,2H,3H -N,N-diméthylperfluorododecan-1-aminium	9:1:2 FTB	171184-04-6	C ₁₆ H ₁₃ F ₂₀ NO ₂	631,3			x					
4 :2 Fluorotélomère sulfonamide bétaines	4:2 FTAB		C ₁₃ H ₁₉ F ₉ N ₂ O ₄ S	470,1	Fluorotélomères sulfonamides alkylbétaines (FTAB)	(x)	x					
1-Propanaminium, N-(carboxyméthyl)-N,N-diméthyl-3-[[[(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctyl)sulfonyl]amino]-, hydroxyde	CDPOS	34455-29-3	C ₁₅ H ₁₉ F ₁₃ N ₂ O ₄ S	570,1		x	x					
8 :2 Fluorotélomère sulfonamide bétaines	6:2 FTAB											
1-Propanaminium,N-(carboxyméthyl)-3-(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,12-heneicosafuorododecyl)sulfonylamino-N,N-diméthyl-, inner sel	10:2 FTAB	34455-35-1	C ₁₉ H ₁₉ F ₂₁ N ₂ O ₄ S	770,0		(x)	x					
N-(3-(diméthyle amine) propyl)-perfluorobutane-1-sulfonamide	PBSaAm	68555-77-1	C ₉ H ₁₃ F ₉ N ₂ O ₂ S	384,3	Perfluoroalkyle		x					
N-(3-(diméthyle amine) propyl)-perfluoropentane-1-sulfonamide	PFPeSaAm	68555-78-2	C ₁₀ H ₁₃ F ₁₁ N ₂ O ₂ S	434,3	Sulfonamide		x					
N-(3-diméthylaminopropan-1-yl)perfluoro-1-hexanesulfonamide	PFHxSaAm	50598-28-2	C ₁₁ H ₁₃ F ₁₃ N ₂ O ₂ S	484	Amines		x					
N-(3-diméthylaminopropan-1-yl)perfluoro-1-heptanesulfonamide	PFOSaAm	13417-01-1	C ₁₂ H ₁₃ F ₁₅ N ₂ O ₂ S	587	(PFSaAm)		x					
N-[3-(perfluoro-1-hexanesulfonamido)propan-1-yl]-N,N,N-triméthylammonium	N-TAmP-FHxSA	38850-51-0	C ₁₂ H ₁₃ F ₁₃ N ₂ O ₂ S	498,1			x					
N-diméthyle ammonio propyl perfluorohexane sulfonamide	AmPr-FHxSA						x					
N-triméthyle ammonio propyl perfluorohexane sulfonamide	TAmPr-FHxSA						x					
-(N-(3-(diméthylamino)propyl)-perfluoropropylsulfonamido)propanoic acide	PFPrSaAmA			407	Perfluoroalkyle sulfonamide		x					
3-(N-(3-(diméthylamino)propyl)-perfluorobutylsulfonamido)propanoic acide	PFBSaAmA			457	amine carboxylate		x					
3-(N-(3-(diméthylamino)propyl)-perfluoropentylsulfonamido)propanoic acide	PFPeSaAmA			507	(PFSaAmA)		x					
3-(N-(3-(diméthylamino)propyl)-perfluorohexylsulfonamido)propanoic acide	PFHxSaAmA			557			x					
3-(N-(3-(diméthylamino)propyl)-perfluorooctylsulfonamido)propanoic acide	PFOSaAmA			657			x					
N-(2-carboxyethyl)-3-(N-(2-carboxyethyl)-perfluoropentylsulfonamido)-N,N-diméthylpropan-1-aminium			C ₁₆ H ₂₂ F ₁₁ N ₂ O ₆ S				x					
N-(2-carboxyethyl)-3-(N-(2-carboxyethyl)-perfluorohexylsulfonamido)-N,N-diméthylpropan-1-aminium							x					
N-(2-carboxyethyl)-3-(N-(2-carboxyethyl)-perfluorohexylsulfonamido)-N,N-diméthylpropan-1-aminium							x					

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
4:2 Fluorotélomère thioether amido sulfonique acide	4:2 FtTAoS	1432486-88-8	C ¹³ H ¹⁷ F ⁹ NO ⁴ S ²	486,4	Fluorotélomères thioéther amido sulfonates (FtTAoS ou FTSAS)		x					
6:2 Fluorotélomère thioether amido sulfonique acide	6:2 FtTAoS	88992-47-6	C ¹³ H ¹⁷ F ¹³ NO ⁴ S ²	586,4			x					
8:2 Fluorotélomère thioether amido sulfonique acide	8:2 FtTAoS	755698-73-8	C ¹⁷ H ¹⁸ F ¹⁷ NO ⁴ S ²	687,4			x					
10:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate	10 :2 FtTAoS						x					
12:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate	12 :2 FtTAoS						x					
14:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate	14 :2 FtTAoS						x					
4:2 fluorotélomère thio hydroxyle ammonium sulfoxyde	4:2 FtTAoS-SO2				Fluorotélomère thiohydroxyle ammonium sulfoxyde (FtAoS-SO2)		(x)					
6:2 fluorotélomère thio hydroxyle ammonium sulfoxyde	6:2 FtTAoS-SO2						x					
8:2 fluorotélomère thio hydroxyle ammonium sulfoxyde	8:2 FtTAoS-SO2						(x)					
4:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate sulfone	4:2 FtTAoS-SO				Fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate sulfone (FtTAoS-SO)		(x)					
6:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate sulfone	6:2 FtTAoS-SO						x					
8:2 fluorotélomère mercapto alkyle amido sulfonate sulfone	8:2 FtTAoS-SO						(x)					
2-hydroxy-N,N,N-triméthyl-3-((1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-octyl)thio)propan-1-aminium	6:2 FtTHN			496	Fluorotélomère Thio Hydroxy Ammonium (FtTHN)		x					
2-hydroxy-N,N,N-triméthyl-3-((1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-decyl)thio)propan-1-aminium	8:2 FtTHN						x					
3,3,4,4,5,5,6,6,6-nonafluorohexanal	4:2 FTAL	135984-67-7	C ₆ H ₃ F ₉ O	262,1	Fluorotélomères d'aldéhydes (FTAL)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- tridecafluorooctanal	6:2 FTAL	56734-81-7	C ₈ H ₃ F ₁₃ O	362,1		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-heptafluorodecanal	8:2 FTAL	135984-68-8	C ₁₀ H ₃ F ₁₇ O	462,1		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,12-henicosafuorododecanal	10:2 FTAL	864551-38-2	C ₁₂ H ₃ F ₂₁ O	562,1		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14,14-pentacosafuorotetradecanal	12:2 FTAL		C ₁₄ H ₃ F ₂₅ O	662,1		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
6:2 fluorotélomère α,β-insaturé aldéhyde	6:2 FTUAL				Fluorotélomère insaturé aldéhyde (FTUAL)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
8:2 fluorotélomère α,β-insaturé aldéhyde	8:2 FTUAL					(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	
6:2 fluorotélomère mercapto alkyl phosphate	6:2 FTMAP		C ₂₁ H ₁₇ F ₂₆ O ₄ PS ₂	922,4	Fluorotélomères mercapto alkyles phosphates diesters (FTMAP)			x				
8:2 fluorotélomère mercapto alkyle phosphate diester	8:2 FTMAP							x				
10:2 fluorotélomère mercapto alkyle phosphate diester	10:2 FTMAP							x				
6:2/8:2 fluorotélomère mercapto alkyle phosphate diester	6:2/8:2 FTMAP							(x)				
8:2/10:2 fluorotélomère mercapto alkyle phosphate diester	8:2/10:2 FTMAP							(x)				
Perfluorotripropylamine	PFTPA	338-83-0	C ₉ F ₂₁ N	521	Fluorotélomères sulfonamides alkyle amines (FTAA)		x					
Perfluorotributylamine	PFTBA	311-89-7	C ₁₂ F ₂₇ N	671			x					
6 :2 fluorotélomère sulfonamide alkyle amine	6 :2 FTAA						x					

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
Perfluorobutyle phosphonique acide	PFBPA	52299-24-8	C ₄ H ₂ F ₉ O ₃ P	350	Acides		(x)		x	(x)		x
Perfluorohexyle phosphonique acide	PFHxPA	40143-76-8	C ₆ H ₂ F ₁₃ O ₃ P	400	perfluoroalcanes		(x)		x	(x)		x
Perfluorooctyle phosphonique acide	PFOPA	40143-78-0	C ₈ H ₂ F ₁₇ O ₃ P	500,1	phosphoniques		(x)		x	(x)		x
Perfluorodécyle phosphonique acide	PFDDPA	52299-26-0	C ₁₀ H ₂ F ₂₁ O ₃ P	600,1	(PFAPA)		(x)		x	(x)		x
6-Chloroperfluorohexylphosphonic acide	Cl-PFHxPA	1283087-54-6	C ₆ H ₂ ClF ₁₂ O ₃ P	415,9	Acides			x				
8-Chloroperfluorooctylphosphonic acide	Cl-PFOPA	NOCAS_1009908	C ₈ H ₂ ClF ₁₆ O ₃ P	515,9	perfluoroalcanes phosphoniques chlorés (PFPAS)			x				
1,1,1,2,2,3,3,4,4-nonafluoro-4-iodo-butane	PFBFI	423-39-2	C ₄ F ₉ I	345,9	Iodures de	x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6-tridecafluoro-6-iodo-hexane	PFPFI	638-79-9	C ₅ F ₁₁ I	395,9	perfluoroalcanes	x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6-tridecafluoro-6-iodo-hexane	PFFHFI	355-43-1	C ₆ F ₁₃ I	445,9	(PFAI)	x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-pentadecafluoro-7-iodo-heptane	PFFHFI	335-58-0	C ₇ F ₁₅ I	496		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8-heptadecafluoro-8-iodo-octane	PFOI	507-63-1	C ₈ F ₁₇ I	545,9		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9-nonadecafluoro-9-iodononane	PFNI	558-97-4	C ₉ F ₁₉ I	596		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9,10,10-heneicosafuoro-10-iodo-décane	PFDI	423-62-1	C ₁₀ F ₂₁ I	645,9		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9,10,10,11,11-tricosafuoro11-iodo-undecane	PFUnDI	307-50-6	C ₁₁ F ₂₃ I	696		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9,10,10,11,11,12,12-pentacosafuoro-12-iodododecane	PFDODI	307-60-8	C ₁₂ F ₂₅ I	745,9		x	x					
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9,10,10,11,11,12,12,13,13-heptacosafuoro-13-iodotridecane	PFTTrDI	376-04-5	C ₁₃ F ₂₇ I	796								
1,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8, 9,9,10,10,11,11,12,12,13,13, 14,14-nonacosafuoro-14-iodotetradécane	PFTeDI	307-63-1	C ₁₄ F ₂₉ I	846								
bis(perfluorohexyle)phosphinique acide	6:6 PFPiA	40143-77-9	C ₁₂ HF ₂₆ O ₂ P	701,9	Phosphinates de		x		x	x		x
Perfluorohexyle perfluorooctyle phosphinique acide	6:8 PFPiA	610800-34-5	C ₁₄ HF ₃₀ O ₂ P	801,9	perfluoroalcanes		x		x	x		x
bis(perfluorooctyle)phosphinique acide	8:8 PFPiA	40143-79-1	C ₁₆ HF ₃₄ O ₂ P	901,9	(PFPiA)		x		x	x		x
1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluoro-1-butanésulfonic acide	PFBSi	34642-43-8	C ₄ HF ₉ O ₂ S	284,1	Acides sulfoniques		(x)	(x)	(x)			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridecafluoro1-hexanesulfonic acide	PFFHxSi	115416-67-6	C ₆ HF ₁₃ O ₂ S	384	perfluoroalcanes		(x)	(x)	(x)			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- heptadecafluoro-1-octanesulfonic acide	PFOSi	647-29-0	C ₈ HF ₁₇ O ₂ S	484	(PFSiAs)		x	(x)	(x)			
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10, 10,10-heneicosafuoro-1-décane sulfonique acide	PFDSi	558-98-5	C ₁₀ HF ₂₁ O ₂ S	584			(x)	(x)	(x)			

Nom	Abréviation	CAS	Formule chimique	Masse molaire	Classe	Industries fluorochimiques	Mousses anti-incendie	Papeteries et emballage	Industries textiles	Industries du métal	Pharma et cosmétique	Industries agro chimiques
Mono[2-(perfluorobutyl)éthyle] phosphate	4:2PAP	150065-76-2	C ₆ H ₆ F ₉ O ₄ P	344	Mono esters de phosphate de fluorotélomères (PAP)			(x)			(x)	
Mono[2-(perfluorohexyl)éthyle] phosphate	6:2PAP	57678-01-0	C ₈ H ₆ F ₁₃ O ₄ P	444				x			x	
Mono[2-(perfluorooctyl)éthyle]phosphate	8:2PAP	57678-03-2	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ O ₄ P	544				x			x	
Mono[2-(perfluorodecyl)éthyle] phosphate	10:2PAP	57678-05-4	C ₁₂ H ₆ F ₂₁ O ₄ P	644				x			X	
Mono[2-(perfluorododecyl)éthyle]phosphate	12:2PAP	57678-07-6	C ₁₄ H ₆ F ₂₅ O ₄ P	744				x			(x)	
3,3,4,4,5,5,6,6,6-nonafluoro-1-hexanol, 1-(dihydrogène	4:2 diPAP	150065-76-2	C ₁₂ H ₉ F ₁₈ O ₄ P	590	Diesters de phosphate de fluorotélomères (diPAP)			x			(x)	
bis(1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl)phosphate	6:2diPAP	57677-95-9	C ₁₆ H ₉ F ₂₆ O ₄ P	790				x			x	
(1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl-1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl) phosphate	6:2/8:2 diPAP	943913-15-3	C ₁₈ H ₉ F ₃₀ O ₄ P	890				x			x	
bis(1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl)phosphate	8:2diPAP	678-41-1	C ₂₀ H ₉ F ₃₄ O ₄ P	990				x			x	
bis(1H,1H,2H,2H-perfluorododecyl)phosphate	10:2diPAP	1895-26-7	C ₂₄ H ₉ F ₄₂ O ₄ P	1190				x			(x)	
bis(1H,1H,2H,2H-perfluorotetradecyl)phosphate	12:2 diPAP	57677-99-3	C ₂₈ H ₉ F ₅₀ O ₄ P	1389,9				x			(x)	
6:2 TriPAP	6:2TriPAP	165325-62-2	C ₂₄ H ₁₂ F ₃₉ O ₄ P	1136	Triesters de phosphate de fluorotélomères (triPAP)			x				
8:2 TriPAP	8:2TriPAP	149790-22-7	C ₃₀ H ₁₂ F ₅₁ O ₄ P	1436				x				
2-(N-ethylperfluorooctane-1-sulfonamido)éthyle phosphate	SAmPAP	3820-83-5	C ₁₂ H ₁₁ F ₁₇ NO ₆ PS	651	Phosphate à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol (SAmPAP)			x				
Bis(2-perfluorooctylsulfonyl-N-ethylaminoethyl) Phosphate	diSAmPAP	2965-52-8	C ₂₄ H ₁₉ F ₃₄ N ₂ O ₈ PS ₂	1204	Diester et triester de phosphate à base de perfluorooctane sulfonamide éthanol (diSAmPAP et triSAmPAP)			x				
1-Octanesulfonamide, N,N',N"-[phosphinylidynetris(oxy-2,1-ethanediyl)]tris[N-ethyl-1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptafluoro-	TriSAmPAP	2250-98-8	C ₃₆ H ₂₇ F ₅₁ N ₃ O ₁₀ PS ₃	1757,7				x				

x: Présence identifiée dans les produits utilisés par ces activités ou dans leurs rejets.

(x) Présence supposée car faisant partie des impuretés ou des produits de dégradation de d'autres substances associées à ces activités.

Annexe 2

Profils de biodégradation connus de certains PFAS et précurseurs

Composés	Classe	Processus	Chemin de dégradation	Références
4:2 FtTAoS	FtTAoS	Biodégradation aérobie dans les sols	4:2 FtTAoS-SO > 4:2 FtTAoS -SO ₂ > 4:2 FTS > 4:2 FTUCA > 3:3 FTCA + PFBA	Harding-Marjanovic et al 2015
6:2 FtTAoS		Biodégradation aérobie dans les sols	6:2 FtTAoS-SO > 6:2 FtTAoS -SO ₂ > 6:2 FTS > 6:2 FTUCA > 5:3 FTCA + PFPeA + PFHxA	
8:2 FtTAoS		Biodégradation aérobie dans les sols	8:2 FtTAoS-SO > 8:2 FtTAoS -SO ₂ > 8:2 FTS > 8:2 FTUCA > 7:3 FTCA + PFHpA + PFOA	
EtFOSE	FASEs	Biodégradation aérobie dans les sédiments marins	EtFOSE aldéhyde > EtFOSAA > EtFOSA > (a) FOSA > PFOSI > PFOS ou (b) EtFOSA alcool > FOSA aldéhyde > FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	Berhanu et al., 2023. Benskin et al., 2013, Meja Avendano et Liu 2015 Rhoads et al., 2008
N-EtFOSE		Boues	N-EtFOSAA > N-EtFOSA > FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	
N-EtFOSA	FASAs	Biodégradation aérobie dans les sédiments marins	(a) FOSA > PFOSI > PFOS ou (b) EtFOSA alcool > FOSA aldéhyde > FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	
FOSA		Boues	FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	Berhanu et al., 2023. Benskin et al., 2013, Meja Avendano et Liu 2015 Rhoads et al., 2008
		Biodégradation aérobie sédiments marins, boues	PFOSI > PFOS	
N-EtFOSAA		Boues	N-EtFOSA > FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	Rhoads et al., 2008
		Biodégradation aérobie dans les sédiments marins	EtFOSA > (a) FOSA > PFOSI > PFOS ou (b) EtFOSA alcool > FOSA aldéhyde > FOSAA > FOSA > PFOSI > PFOS	
FASAA	FASAAs	Boues	FOSA > PFOSI > PFOS	Berhanu et al., 2023. Benskin et al., 2013, Meja Avendano et Liu 2015, Rhoads et al., 2008
6:2 FTAA	FTAAs		6:2 FTSAm > 6:2 FTS > 6:2 FTOH > 6:2 FTAL > (a) 6:2 FTUAL 6:2 > 6:2 FTUCA ou (b) 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou PFPeA ou (b) 5:3 FTCA > 5:3 FTUCA > PFPeA et ou PFBA	Berhanu et al., 2023, D'Agostino et Mabury 2017
6:2 FTAB	FTABs		6:2 FTOH > 6:2 FTAL > (a) 6:2 FTUAL 6:2 > 6:2 FTUCA ou (b) 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou PFPeA ou (b) 5:3 FTCA > 5:3 FTUCA > PFPeA et ou PFBA	Berhanu et al., 2023, D'Agostino et Mabury 2017 Shaw et al., 2019
		Biodégradation aérobie	6:2 FTS > (a) 6:2 sFTOH > 6:2 FTOH > 6:2 FTAL, (b) 6:2 FTOH > 6:2 FTAL, (c) 6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUA > (i majeur) 5:2 cétone > 5:2 FTOH > PFHxA + 4:2 cétone > PFPeA ou (ii mineur) 5:3 FTCA > PFBA + 4:3 FTCA > 4:2 FTCA > 4:2 FTUA	
8:2 FTAC	FTACs	Biodégradation aérobie	8:2 FTOH > PFOA	Liu et Avendano 2013
SAmPAP	SAmPAPs	Biodégradation aérobie dans les sols	EtFOSE > PFOS	Liu et Avendano 2013

Composés	Classe	Processus	Chemin de dégradation	Références
4:2 PAP	PAPs	Biodégradation aérobie dans les sols	4:2 FTOH > 4:2 FTCA > 4:2 FTUCA > 3:3 FTCA + PFBA	Liu et Avendano 2013
6:2 PAP		Biodégradation aérobie dans les sols	6:2 FTOH > 6:2 FTCA > PFHpA + 6:2 FTUCA > PFHxA + 5:2 cétone (> 5:2 FTOH) + 5:3 FTCA > PFPeA	Berhanu et al., 2023, Lee et al., 2010, Liu et Avendano 2013
8:2 PAP		Biodégradation aérobie dans les sols	8:2 FTOH > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > 7:3 FTCA + PFOA	Liu et Avendano 2013
10:2 PAP		Biodégradation aérobie dans les sols	10:2 FTOH > 10:2 FTCA > 10:2 FTUCA > 9:3 FTCA + PFDA	Liu et Avendano 2013
4:2 diPAP		Biodégradation aérobie dans les sols	4:2 PAP > 4:2 FTOH > 4:2 FTCA > 4:2 FTUCA > 3:3 FTCA + PFBA	
6:2 diPAP		Biodégradation aérobie dans les sols	6:2 PAP > 6:2 FTOH > 6:2 FTCA > PFHpA + 6:2 FTUCA > PFHxA + 5:2 cétone (> 5:2 FTOH) + 5:3 FTCA > PFPeA	Berhanu et al., 2023, Lee et al., 2010
8:2 diPAP	FTOH	Biodégradation aérobie dans les sols	8:2 PAP > 8:2 FTOH > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > 7:3 FTCA + PFOA	
10:2 diPAP		Biodégradation aérobie dans les sols	10:2 PAP > 10:2 FTOH > 10:2 FTCA > 10:2 FTUCA > 9:3 FTCA + PFDA	
6:6 PFPIA		Biodégradation aérobie	PFHxPA	(Gao et al., 2023)
8:8 PFPIA			PFOPA	
6:2 FTOH		Biodégradation aérobie dans les sols/sédiments/boues	6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:2 FT cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA + PFHxS ou (b) 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA + 3-hydroxy-5:3 FTUCA > PFPeA + PFHxA	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation	6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:3 cétone aldéhyde > 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou 4:2 cétone > 4:2 sFTOH > PFBA + PFPeA ou (b) 5:3 FTUCA > 5:2 FTCA > 5:2 FTUCA > 4:3 FTUCA > 4:3 FTCA > 4:2 FTCA > 4:2 FTUCA	LaFond et al., 2023
	8:2 FTOH	Biodégradation anaérobie dans les sols/sédiments/boues	6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > 3-fluoro 5:3 acide ou du 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA ou 5:2 oléfine	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation aérobie dans les sols/sédiments/boues	8:2 FTAL > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > (a) 7:2 FT cétone > 7:2 sFTOH > PFHxA + PFHpA ou (b) 7:3 FTUCA > 7:3 FTCA + 3-hydroxy-7:3 FTUCA > pFHpA + PFOA	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation anaérobie dans les sols/sédiments/boues	8:2 FTAL > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > 3-fluoro 7:3 acide ou du 7:3 FTUCA > 7:3 FTCA ou 7:2 oléfine	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation anaérobie	8:2 FTAL > (i) 8:2 FTCA > 7:3 acide > PFOA OU 7:2 OLÉFINE > 7:2 sFTOH > PFOA, pFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA (ii) 8:2 FTUCA > 7:3 acide > 7:2 OLÉFINE > 7:2 sFTOH > PFOA, pFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA	Li et al., 2018

Composés	Classe	Processus	Chemin de dégradation	Références
6:2 FTS	FTS	Biotransformations aérobies et anoxiques	6:2 FTUCA > 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA + PFHxA	Wang et al., 2011
		Désulfonation et défluoration	6:2 FTOH > 6:2 FTAL > 6:2 FTCA > (a) pFHpA ou (b) 6:2 FTUCA > 5:3 FTCA > αOH 5:3 FTCA > 4:3 FTCA	Yang et al., 2022
		Dégradation aérobie	6:2 FTOH ou directement 6:2 FTOH > 6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (i) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA et ou PFHxA > 5:3 FTCA ou (ii) 5:3 FTUCA > PFBA et ou 5:3 FTCA > 4:3 FTCA ou 3-hydroxy 5:3 FTUCA > PFPeA et PFHxA	Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie	6:2 FTOH ou directement 6:2 FTOH > 6:2 FTAL > 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (i) 5:3 FTUCA > 5:2 oléfine et ou 5:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide	Berhanu et al., 2024
8:2 FTS		Dégradation aérobie	8:2 FTOH ou directement 8:2 FTOH > 8:2 FTAL > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > (i) 7:2 cétone > 7:2 sFTOH > PFHpA et ou PFHxA ou (ii) 7:3 FTUCA > PFBA et ou 7:3 FTCA ou 3-hydroxy 7:3 FTUCA > PFOA et PFHpA	Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie	8:2 FTOH ou directement 8:2 FTOH > 8:2 FTAL > 8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > (i) 7:3 FTUCA > 7:2 oléfine et ou 7:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide	Berhanu et al., 2023
4:2 FTUCA 6:2 FTUCA	FTUCAs	Biodégradation aérobie dans les sols	3:3 FTCA + PFBA	Harding-Marjanovic et al 2015
		Oxidation à l'ozone/dégradation UV dans les eaux de surface et souterraines	PFHxA + PFPeA	Anumol et al., 2016
		Biodégradation aérobie synthèse biblio	(a) 5:2 FT cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA + PFHxS ou (b) 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA + 3-hydroxy-5:3 FTUCA > PFPeA + PFHxA	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation anaérobie	3-fluoro 5:3 acide ou du 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA ou 5:2 oléfine	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation aérobie	(a) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA ou PFHxA > 5:3 FTCA, (b) 5:3 FTUCA > PFBA ou 5:3 FTCA > 4:3 FTCA	Parsons et al., 2008, Fromel et Knepper 2010, Liu et Avendano 2013, Berhanu et al., 2023
8:2 FTUCA		Oxidation à l'ozone/dégradation UV dans les eaux	PFOA + PFHpA + PFHxA	Anumol et al., 2016
		Biodégradation aérobie	(i) 7:3 FTUCA > PFHxA ou 3-OH 7:3 acide ou 7:3 FTCA > PFHpA, (ii) 7:2 sFTOH > PFOA et ou 7:2 cétone > 2H PFOA	Parsons et al., 2008, Fromel et Knepper 2010, Liu et Avendano 2013, Berhanu et al., 2023
		Biodégradation anaérobie	7:3 acide > 7:2 OLÉFINE > 7:2 sFTOH > PFOA, pFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA	Li et al., 2018
		Dégradation aérobie	(i) 7:2 cétone > 7:2 sFTOH > PFHpA et ou PFHxA ou (ii) 7:3 FTUCA > PFBA et ou 7:3 FTCA ou 3-hydroxy 7:3 FTUCA > PFOA et PFHpA	Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie	(i) 7:3 FTUCA > 7:2 oléfine et ou 7:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide	Berhanu et al., 2023
CI-6:2 PFESA	CI-PFESA	Dégradation anaérobie	1H-6:2 PFESA, 1H-6:2 PFUESA, 2H-6:2 PFESA	Lin et al., 2017
CI-8:2 PFESA		Dégradation anaérobie	1H-8:2 PFESA, 1H-8:2 PFUESA, 2H-8:2 PFESA	

Composés	Classe	Processus	Chemin de dégradation	Références
5:3 FTCA	FTCAs	Dégradation aérobie dans des boues	4:3 FTCA ou PFPeA ou α OH 5:3 FTCA > 4:3 FTCA	Parsons et al., 2008, Fromel et Knepper 2010, Liu et Avendano 2013, Berhanu et al., 2023, Yang et al., 2022
7:3 FTCA		Biodégradation aérobie	5:3 FTCA > 5:3 FTUCA > PFPeA et ou PFBA PFHpA	Berhanu et al., 2023 Parsons et al., 2008, Fromel et Knepper 2010, Liu et Avendano 2013, Berhanu et al., 2023
8:2 FTCA		Dégradation anaérobie Dégradation aérobie	8:2 FTUCA > (i) 7:3 FTUCA > 7:2 oléfine et ou 7:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide 8:2 FTUCA > (i) 7:2 cétone > 7:2 sFTOH > PFHpA et ou PFHxA ou (ii) 7:3 FTUCA > PFBA et ou 7:3 FTCA ou 3-hydroxy 7:3 FTUCA > PFOA et PFHpA	Berhanu et al., 2023 Berhanu et al., 2023
6:2 FTCA		Dégradation aérobie	6:2 FTUCA > (i) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA et ou PFHxA > 5:3 FTCA ou (ii) 5:3 FTUCA > PFBA et ou 5:3 FTCA > 4:3 FTCA ou 3-hydroxy 5:3 FTUCA > PFPeA et PFHxA	Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie Désulfonation et défluoration	6:2 FTUCA > (i) 5:3 FTUCA > 5:2 oléfine et ou 5:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide (a) pFHpA ou (b) 6:2 FTUCA > 5:3 FTCA > α OH 5:3 FTCA > 4:3 FTCA 6:2 FTUCA > (a) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou PFPeA ou (b) 5:3 FTCA > 5:3 FTUCA > PFPeA et ou PFBA	Berhanu et al., 2024 Yang et al., 2022 Berhanu et al., 2023
6:2 FTAL	FTALs	Désulfonation et défluoration Dégradation aérobie	6:2 FTCA > (a) pFHpA ou (b) 6:2 FTUCA > 5:3 FTCA > α OH 5:3 FTCA > 4:3 FTCA 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (i) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA et ou PFHxA > 5:3 FTCA ou (ii) 5:3 FTUCA > PFBA et ou 5:3 FTCA > 4:3 FTCA ou 3-hydroxy 5:3 FTUCA > PFPeA et PFHxA	Yang et al., 2022 Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie Biodégradation aérobie (sols/sédiments/boues) Biodégradation	6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (i) 5:3 FTUCA > 5:2 oléfine et ou 5:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:2 FT cétone > 5:2 sFTOH > PFPeA + PFHxS ou (b) 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA + 3-hydroxy-5:3 FTUCA > PFPeA + PFHxA 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:3 cétone aldéhyde > 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou 4:2 cétone > 4:2 sFTOH > PFBA + PFPeA ou (b) 5:3 FTUCA > 5:2 FTCA > 5:2 FTUCA > 4:3 FTUCA > 4:3 FTCA > 4:2 FTCA > 4:2 FTUCA	Berhanu et al., 2024 Berhanu et al., 2023 LaFond et al., 2023
		Biodégradation anaérobie dans les sols/sédiments/boues	6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > 3-fluoro 5:3 acide ou du 5:3 FTUCA > 5:3 FTCA ou 5:2 oléfine a) 6:2 FTUAL 6:2 > 6:2 FTUCA ou (b) 6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (a) 5:2 cétone > 5:2 sFTOH > PFHxA ou PFPeA ou (b) 5:3 FTCA > 5:3 FTUCA > PFPeA et ou PFBA	Berhanu et al., 2023 Berhanu et al., 2023, D'Agostino et Mabury 2017
		Biodégradation aérobie	6:2 FTCA > 6:2 FTUCA > (i) 5:2 cétone > 5:2 FTOH > PFHxA + 4:2 cétone > PFPeA ou (ii mineur) 5:3 FTCA > PFBA + 4:3 FTCA > 4:2 FTCA > 4:2 FTUA	Shaw et al., 2019
8:2 FTAL		Dégradation aérobie	8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > (i) 7:2 cétone > 7:2 sFTOH > PFHpA et ou PFHxA ou (ii) 7:3 FTUCA > PFBA et ou 7:3 FTCA ou 3- hydroxy 7:3 FTUCA > PFOA et PFHpA	Berhanu et al., 2023
		Dégradation anaérobie	8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > (i) 7:3 FTUCA > 7:2 oléfine et ou 7:3 FTCA (ii) 3-fluoro 5:3 acide	Berhanu et al., 2023
		Biodégradation anaérobie Biodégradation anaérobie	8:2 FTCA > 8:2 FTUCA > 3-fluoro 7:3 acide ou du 7:3 FTUCA > 7:3 FTCA ou 7:2 oléfine (i) 8:2 FTCA > 7:3 acide > PFOA OU 7:2 OLÉFINE > 7:2 sFTOH > PFOA, pFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA (ii) 8:2 FTUCA > 7:3 acide > 7:2 OLÉFINE > 7:2 sFTOH > PFOA, pFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA	Berhanu et al., 2023 Li et al., 2018
PFOS	PFSAs	Biodégradation aérobie Biodégradation aérobie	PFHpA et F- PFBS, PFHxS	Chetverikov et al., 2017 Kwon et al., 2014
PFOA	PFCAs	Biodégradation anaérobie Biodégradation anaérobie Biodégradation anaérobie	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, F- PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, F- HFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA	Ruiz Uriguen et al., 2022 Huang et al., 2022 Huang et Jaffé 2019

Références

- Ahrens, L., Norström, K., Viktor, T., Cousins, A.P., Josefsson, S.**, 2015. Stockholm Arlanda Airport as a source of per-and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish. *Chemosphere* 129, 33–38.
- Ahrens, L., Rakovic, J., Axelson, S., Kallenborn, R.**, 2016. Source Tracking and Impact of Per-and Polyfluoroalkyl Substances at Svalbard-FluoroImpact, in: *Svalbard Final Report Notes 3-17*. UNIS.
- Alnehem, I.**, 2016. Assessment on groundwater contamination from a former hard chromium plating site in Iggesund.
- Anderson, R.H., Long, G.C., Porter, R.C., Anderson, J.K.**, 2016. Occurrence of select perfluoroalkyl substances at US Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire-training areas: Field-validation of critical fate and transport properties. *Chemosphere* 150, 678–685.
- Andraju, N., Curtzwiler, G., Ji, Y., Kozliak, E., Ranganathan, P.**, 2023. Machine Learning Models for PFAS Tracking, Detection and Remediation: A Review, in: *2023 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT)*. IEEE, pp. 137–142.
- Androulakis, A., Alygizakis, N., Gkotsis, G., Nika, M.-C., Nikolopoulou, V., Bizani, E., Chadwick, E., Cincinelli, A., Claßen, D., Danielsson, S.**, 2022. Determination of 56 per-and polyfluoroalkyl substances in top predators and their prey from Northern Europe by LC-MS/MS. *Chemosphere* 287, 131775.
- Bach, C., Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hemard, J., Sagres, V., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2017. The impact of two fluoropolymer manufacturing facilities on downstream contamination of a river and drinking water resources with per-and polyfluoroalkyl substances. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 4916–4925.
- Backe, W.J., Day, T.C., Field, J.A.**, 2013. Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from US military bases by nonaqueous large-volume injection HPLC-MS/MS. *Environmental science & technology* 47, 5226–5234.
- Baduel, C., Mueller, J.F., Rotander, A., Corfield, J., Gomez-Ramos, M.-J.**, 2017. Discovery of novel per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) at a fire fighting training ground and preliminary investigation of their fate and mobility. *Chemosphere* 185, 1030–1038.
- Bao, J., Yu, W.-J., Liu, Y., Wang, X., Jin, Y.-H., Dong, G.-H.**, 2019. Perfluoroalkyl substances in groundwater and home-produced vegetables and eggs around a fluorochemical industrial park in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171, 199–205.
- Barzen-Hanson, K.A., Roberts, S.C., Choyke, S., Oetjen, K., McAlees, A., Riddell, N., McCrindle, R., Ferguson, P.L., Higgins, C.P., Field, J.A.**, 2017. Discovery of 40 classes of per-and polyfluoroalkyl substances in historical aqueous film-forming foams (AFFFs) and AFFF-impacted groundwater. *Environmental science & technology* 51, 2047–2057.

- Bečanová, J., Melymuk, L., Vojta, Š., Komprdová, K., Klánová, J., 2016.** Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere* 164, 322–329.
- Benskin, J.P., Ikonomou, M.G., Gobas, F.A., Woudneh, M.B., Cosgrove, J.R., 2012a.** Observation of a novel PFOS-precursor, the perfluorooctane sulfonamido ethanol-based phosphate (SAmPAP) diester, in marine sediments. *Environmental science & technology* 46, 6505–6514.
- Benskin, J.P., Li, B., Ikonomou, M.G., Grace, J.R., Li, L.Y., 2012b.** Per-and polyfluoroalkyl substances in landfill leachate: patterns, time trends, and sources. *Environmental science & technology* 46, 11532–11540.
- Berhanu, A., Mutanda, I., Taolin, J., Qaria, M.A., Yang, B., Zhu, D., 2023.** A review of microbial degradation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Biotransformation routes and enzymes. *Science of The Total Environment* 859, 160010.
- Bolan, N., Hoang, S.A., Yan, Y., Ramanayaka, S., Koliyabandara, P., Chamanee, G., Wijesekara, H., Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Vithanage, M., 2021.** Landfills as Sources of PFAS Contamination of Soil and Groundwater, in: *Forever Chemicals*. CRC Press, pp. 119–142.
- Bugsel, B., Bauer, R., Herrmann, F., Maier, M.E., Zwiener, C., 2022.** LC-HRMS screening of per-and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) in impregnated paper samples and contaminated soils. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 414, 1217–1225.
- Busch, J., Ahrens, L., Sturm, R., Ebinghaus, R., 2010.** Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachates. *Environmental pollution* 158, 1467–1471.
- Cavelan, A., Togola, A., 2024.** État des lieux des substances poly et perfluorées associées à l'utilisation des mousses anti-incendie (AFFF). Rapport final V1 (No. BRGM/RP-73431-FR). BRGM.
- Chai, J., Lei, P., Xia, X., Xu, G., Wang, D., Sun, R., Gu, J., Tang, L., 2017.** Pollution patterns and characteristics of perfluorinated compounds in surface water adjacent potential industrial emission categories of Shanghai, China. *Ecotoxicology and environmental safety* 145, 659–664.
- Charbonnet, J.A., Rodowa, A.E., Joseph, N.T., Guelfo, J.L., Field, J.A., Jones, G.D., Higgins, C.P., Helbling, D.E., Houtz, E.F., 2021.** Environmental source tracking of per-and polyfluoroalkyl substances within a forensic context: current and future techniques. *Environmental science & technology* 55, 7237–7245.
- Chen, H., Yao, Y., Zhao, Z., Wang, Y., Wang, Q., Ren, C., Wang, B., Sun, H., Alder, A.C., Kannan, K., 2018.** Multimedia distribution and transfer of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) surrounding two fluorochemical manufacturing facilities in Fuxin, China. *Environmental science & technology* 52, 8263–8271.
- Choi, Y.J., Helbling, D.E., Liu, J., Olivares, C.I., Higgins, C.P., 2022.** Microbial biotransformation of aqueous film-forming foam derived polyfluoroalkyl substances. *Science of The Total Environment* 824, 153711.

- Coffin, E.S., Reeves, D.M., Cassidy, D.P.**, 2022. PFAS in municipal solid waste landfills: Sources, leachate composition, chemical transformations, and future challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 100418.
- Cook, E.K., Olivares, C.I., Antell, E.H., Yi, S., Nickerson, A., Choi, Y.J., Higgins, C.P., Sedlak, D.L., Alvarez-Cohen, L.**, 2022. Biological and chemical transformation of the six-carbon polyfluoroalkyl substance N-dimethyl ammonio propyl perfluorohexane sulfonamide (AmPr-FHxSA). *Environmental Science & Technology* 56, 15478–15488.
- D'Agostino, L.A., Mabury, S.A.**, 2017a. Aerobic biodegradation of 2 fluorotelomer sulfonamide–based aqueous film–forming foam components produces perfluoroalkyl carboxylates. *Environmental toxicology and chemistry* 36, 2012–2021.
- D'Agostino, L.A., Mabury, S.A.**, 2017b. Certain perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances associated with aqueous film forming foam are widespread in Canadian surface waters. *Environmental Science & Technology* 51, 13603–13613.
- D'Agostino, L.A., Mabury, S.A.**, 2014. Identification of novel fluorinated surfactants in aqueous film forming foams and commercial surfactant concentrates. *Environmental science & technology* 48, 121–129.
- Dasu, K., Xia, X., Siriwardena, D., Klupinski, T.P., Seay, B.**, 2022. Concentration profiles of per-and polyfluoroalkyl substances in major sources to the environment. *Journal of Environmental Management* 301, 113879.
- Dauchy, X.**, 2023. Evidence of large-scale deposition of airborne emissions of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) near a fluoropolymer production plant in an urban area. *Chemosphere* 337, 139407.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Colin, A., Hemard, J., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2017. Mass flows and fate of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the wastewater treatment plant of a fluorochemical manufacturing facility. *Science of the Total Environment* 576, 549–558.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2019a. Poly-and perfluoroalkyl substances in runoff water and wastewater sampled at a firefighter training area. *Archives of environmental contamination and toxicology* 76, 206–215.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hémar, J., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2019b. Deep seepage of per-and polyfluoroalkyl substances through the soil of a firefighter training site and subsequent groundwater contamination. *Chemosphere* 214, 729–737.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2012a. Relationship between industrial discharges and contamination of raw water resources by perfluorinated compounds. Part I: case study of a fluoropolymer manufacturing plant. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 89, 525–530.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2012b. Relationship between industrial discharges and contamination of raw water resources by perfluorinated compounds: Part II: Case study of a fluorotelomer polymer manufacturing plant. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 89, 531–536.

- De Silva, A.O., Spencer, C., Scott, B.F., Backus, S., Muir, D.C.**, 2011. Detection of a cyclic perfluorinated acid, perfluoroethylcyclohexane sulfonate, in the Great Lakes of North America. *Environmental Science & Technology* 45, 8060–8066.
- D'eon, J.C., Crozier, P.W., Furdui, V.I., Reiner, E.J., Libelo, E.L., Mabury, S.A.**, 2009. Observation of a commercial fluorinated material, the polyfluoroalkyl phosphoric acid diesters, in human sera, wastewater treatment plant sludge, and paper fibers. *Environmental science & technology* 43, 4589–4594.
- Du, Z., Deng, S., Liu, D., Yao, X., Wang, Yu, Lu, X., Wang, B., Huang, J., Wang, Yujue, Xing, B.**, 2016. Efficient adsorption of PFOS and F53B from chrome plating wastewater and their subsequent degradation in the regeneration process. *Chemical Engineering Journal* 290, 405–413.
- Eggen, T., Moeder, M., Arukwe, A.**, 2010. Municipal landfill leachates: a significant source for new and emerging pollutants. *Science of the Total Environment* 408, 5147–5157.
- Fath, A., Sacher, F., McCaskie, J.E.**, 2016. Electrochemical decomposition of fluorinated wetting agents in plating industry waste water. *Water Science and Technology* 73, 1659–1666.
- Feng, X., Yi, S., Shan, G., Chen, X., Yang, Y., Yang, L., Jia, Y., Zhu, Y., Zhu, L.**, 2023. Occurrence of perfluoroalkyl substances in the environment compartments near a mega fluorochemical industry: Implication of specific behaviors and emission estimation. *Journal of Hazardous Materials* 445, 130473.
- Filipovic, M., Woldegiorgis, A., Norström, K., Bibi, M., Lindberg, M., Österås, A.-H.**, 2015. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. *Chemosphere* 129, 39–45.
- Fuertes, I., Gómez-Lavín, S., Elizalde, M.P., Urtiaga, A.**, 2017. Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates. *Chemosphere* 168, 399–407.
- Gaines, L.G.**, 2023. Historical and current usage of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of Industrial Medicine* 66, 353–378.
- Gallen, C., Drage, D., Eaglesham, G., Grant, S., Bowman, M., Mueller, J.F.**, 2017. Australia-wide assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachates. *Journal of hazardous materials* 331, 132–141.
- Gao, Z., Yi, S., Xue, M., Zhu, K., Yang, R., Wang, T., Sun, H., Zhu, L.**, 2023. Microbial biotransformation mechanisms of PFPIAs in soil unveiled by metagenomic analysis. *Journal of Hazardous Materials* 448, 130896.
- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trier, X., Wang, Z.**, 2020. An overview of the uses of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts* 22, 2345–2373.
- Gremmel, C., Frömel, T., Knepper, T.P.**, 2016. Systematic determination of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in outdoor jackets. *Chemosphere* 160, 173–180.

- Gu, C., Xu, C., Zhou, Q., Shen, C., Ma, C., Liu, S., Yin, S., Li, F., 2021.** Congener-and isomer-specific Perfluorinated compounds in textile wastewater from Southeast China. *Journal of Cleaner Production* 320, 128897.
- Hale, S.E., Arp, H.P.H., Slinde, G.A., Wade, E.J., Bjørseth, K., Breedveld, G.D., Straith, B.F., Moe, K.G., Jartun, M., Høisæter, Å., 2017.** Sorbent amendment as a remediation strategy to reduce PFAS mobility and leaching in a contaminated sandy soil from a Norwegian firefighting training facility. *Chemosphere* 171, 9–18.
- Hale, S.E., Canivet, B., Rundberget, T., Langberg, H.A., Allan, I.J., 2021.** Using passive samplers to track Per and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) emissions from the paper industry: laboratory calibration and field verification. *Frontiers in Environmental Science* 9, 621.
- Hamid, H., Li, L., 2016.** Role of wastewater treatment plant (WWTP) in environmental cycling of poly-and perfluoroalkyl (PFAS) compounds. *Ecocycles* 2, 43–53.
- Hamid, H., Li, L.Y., Grace, J.R., 2018.** Review of the fate and transformation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environmental Pollution* 235, 74–84.
- Harris, K.J., Munoz, G., Woo, V., Sauv  , S., Rand, A.A., 2022.** Targeted and suspect screening of per-and polyfluoroalkyl substances in cosmetics and personal care products. *Environmental Science & Technology* 56, 14594–14604.
- He, A., Liang, Y., Li, F., Lu, Y., Liu, C., Li, J., Zhou, Z., Zhu, N., Liao, C., Wang, Y., 2022.** Vital environmental sources for multitudinous fluorinated chemicals: new evidence from industrial byproducts in multienvironmental matrices in a fluorochemical manufactory. *Environmental Science & Technology* 56, 16789–16800.
- Hepburn, E., Madden, C., Szabo, D., Coggan, T.L., Clarke, B., Currell, M., 2019.** Contamination of groundwater with per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban re-development precinct. *Environmental Pollution* 248, 101–113.
- Heydebreck, F., Tang, J., Xie, Z., Ebinghaus, R., 2016.** Emissions of per-and polyfluoroalkyl substances in a textile manufacturing plant in China and their relevance for workers' exposure. *Environmental science & technology* 50, 10386–10396.
- Høisæter,   ., Pfaff, A., Breedveld, G.D., 2019.** Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of contaminant hydrology* 222, 112–122.
- Holmquist, H., 2016.** Environmental Assessment of Alternative Durable Water Repellent Chemicals. Chalmers University of Technology.
- Holmquist, H., Roos, S., Schellenberger, S., J  nsson, C., Peters, G., 2021.** What difference can drop-in substitution actually make? A life cycle assessment of alternative water repellent chemicals. *Journal of Cleaner Production* 329, 129661.
- Houtz, E.F., Higgins, C.P., Field, J.A., Sedlak, D.L., 2013.** Persistence of perfluoroalkyl acid precursors in AFFF-impacted groundwater and soil. *Environmental science & technology* 47, 8187–8195.

- Houtz, E.F., Sutton, R., Park, J.-S., Sedlak, M.**, 2016. Poly-and perfluoroalkyl substances in wastewater: Significance of unknown precursors, manufacturing shifts, and likely AFFF impacts. *Water research* 95, 142–149.
- Huset, C.A., Barlaz, M.A., Barofsky, D.F., Field, J.A.**, 2011. Quantitative determination of fluorochemicals in municipal landfill leachates. *Chemosphere* 82, 1380–1386.
- Jacob, P., Barzen-Hanson, K.A., Helbling, D.E.**, 2021. Target and nontarget analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in wastewater from electronics fabrication facilities. *Environmental Science & Technology* 55, 2346–2356.
- Janousek, R.M., Lebertz, S., Knepper, T.P.**, 2019. Previously unidentified sources of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances from building materials and industrial fabrics. *Environmental Science: Processes & Impacts* 21, 1936–1945.
- Kärman, A., Elgh-Dalgren, K., Lafossas, C., Møskeland, T.**, 2011. Environmental levels and distribution of structural isomers of perfluoroalkyl acids after aqueous fire-fighting foam (AFFF) contamination. *Environmental chemistry* 8, 372–380.
- Keml, O.**, 2015. use of highly 717 fluorinated substances and alternatives. Swedish Chemicals Agency.
- Kissa, E.**, 2001. Fluorinated surfactants and repellents. CRC Press.
- Knutsen, H., Mæhlum, T., Haarstad, K., Slinde, G.A., Arp, H.P.H.**, 2019. Leachate emissions of short-and long-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from various Norwegian landfills. *Environmental Science: Processes & Impacts* 21, 1970–1979.
- Lang, J.R., Allred, B.M., Field, J.A., Levis, J.W., Barlaz, M.A.**, 2017. National estimate of per- and polyfluoroalkyl substance (PFAS) release to US municipal landfill leachate. *Environmental science & technology* 51, 2197–2205.
- Langberg, H.A., Arp, H.P.H., Breedveld, G.D., Slinde, G.A., Høiseter, Å., Grønning, H.M., Jartun, M., Rundberget, T., Jenssen, B.M., Hale, S.E.**, 2021. Paper product production identified as the main source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Norwegian lake: Source and historic emission tracking. *Environmental Pollution* 273, 116259.
- Langberg, H.A., Breedveld, G.D., Grønning, H.M., Kvennås, M., Jenssen, B.M., Hale, S.E.**, 2019. Bioaccumulation of fluorotelomer sulfonates and perfluoroalkyl acids in marine organisms living in aqueous film-forming foam impacted waters. *Environmental science & technology* 53, 10951–10960.
- Langberg, H.A., Hale, S.E., Breedveld, G.D., Jenssen, B.M., Jartun, M.**, 2022. A review of PFAS fingerprints in fish from Norwegian freshwater bodies subject to different source inputs. *Environmental Science: Processes & Impacts* 24, 330–342.
- Lee, H., Mabury, S.A.**, 2017. Sorption of perfluoroalkyl phosphonates and perfluoroalkyl phosphinates in soils. *Environmental Science & Technology* 51, 3197–3205.
- Lin, Y., Ruan, T., Liu, A., Jiang, G.**, 2017. Identification of novel hydrogen-substituted polyfluoroalkyl ether sulfonates in environmental matrices near metal-plating facilities. *Environmental Science & Technology* 51, 11588–11596.

- Liu, J., Avendaño, S.M.**, 2013. Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: a review. *Environment international* 61, 98–114.
- LLANO, D.H.S.**, 2015. TOXICITY OF PERFLUORINATED PHOSPHONIC ACIDS IN CHLAMYDOMONAS.
- Luo, Y.-S., Aly, N.A., McCord, J., Strynar, M.J., Chiu, W.A., Dodds, J.N., Baker, E.S., Rusyn, I.**, 2020. Rapid characterization of emerging per-and polyfluoroalkyl substances in aqueous film-forming foams using ion mobility spectrometry–mass spectrometry. *Environmental science & technology* 54, 15024–15034.
- Maizel, A.C., Thompson, A., Tighe, M., Veras, S.E., Rodowa, A.E., Falkenstein-Smith, R., Benner, B.A., Hoffman, K., Donnelly, M.K., Hernandez, O.**, 2023. Per-and Polyfluoroalkyl Substances in New Firefighter Turnout Gear Textiles. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology.
- Masoner, J.R., Kolpin, D.W., Cozzarelli, I.M., Smalling, K.L., Bolyard, S.C., Field, J.A., Furlong, E.T., Gray, J.L., Lozinski, D., Reinhart, D.**, 2020. Landfill leachate contributes per-/poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and pharmaceuticals to municipal wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology* 6, 1300–1311.
- Monge Brenes, A.L., Curtzwiler, G., Dixon, P., Harrata, K., Talbert, J., Vorst, K.**, 2019. PFOA and PFOS levels in microwave paper packaging between 2005 and 2018. *Food Additives & Contaminants: Part B* 12, 191–198.
- Moody, C.A., Field, J.A.**, 2000. Perfluorinated surfactants and the environmental implications of their use in fire-fighting foams. *Environmental science & technology* 34, 3864–3870.
- Mumtaz, M., Bao, Y., Li, W., Kong, L., Huang, J., Yu, G.**, 2019. Screening of textile finishing agents available on the Chinese market: an important source of per-and polyfluoroalkyl substances to the environment. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 13, 1–10.
- Na, S., Hai, R., Wang, X., Li, N.**, 2021. Trends and Levels of Perfluorinated Compounds in Soil and Sediment Surrounding a Cluster of Metal Plating Industries. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 30, 423–435.
- Paustenbach, D.J., Panko, J.M., Scott, P.K., Unice, K.M.**, 2006. A methodology for estimating human exposure to perfluorooctanoic acid (PFOA): a retrospective exposure assessment of a community (1951–2003). *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 70, 28–57.
- Peaslee, G.F., Wilkinson, J.T., McGuinness, S.R., Tighe, M., Caterisano, N., Lee, S., Gonzales, A., Roddy, M., Mills, S., Mitchell, K.**, 2020. Another pathway for firefighter exposure to per-and polyfluoroalkyl substances: Firefighter textiles. *Environmental Science & Technology Letters* 7, 594–599.
- Peffly, M., Geary, N., Staudigel, J.**, 2004. Personal care composition containing a cationic cellulose polymer and an anionic surfactant system. Google Patents.
- Place, B.J., Field, J.A.**, 2012. Identification of novel fluorochemicals in aqueous film-forming foams used by the US military. *Environmental science & technology* 46, 7120–7127.

- Prevedouros, K., Cousins, I.T., Buck, R.C., Korzeniowski, S.H., 2006.** Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. *Environmental science & technology* 40, 32–44.
- Pütz, K.W., Namazkar, S., Plassmann, M., Benskin, J.P., 2022.** Are cosmetics a significant source of PFAS in Europe? product inventories, chemical characterization and emission estimates. *Environmental Science: Processes & Impacts* 24, 1697–1707.
- Qu, Y., Huang, J., Willand, W., Weber, R., 2020.** Occurrence, removal and emission of per-and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) from chrome plating industry: A case study in Southeast China. *Emerging Contaminants* 6, 376–384.
- Reinikainen, J., Perkola, N., Äystö, L., Sorvari, J., 2022.** The occurrence, distribution, and risks of PFAS at AFFF-impacted sites in Finland. *Science of the Total Environment* 829, 154237.
- Rewerts, J.N., Morré, J.T., Massey Simonich, S.L., Field, J.A., 2018.** In-vial extraction large volume gas chromatography mass spectrometry for analysis of volatile PFASs on papers and textiles. *Environmental science & technology* 52, 10609–10616.
- Ruan, T., Wang, Y., Wang, T., Zhang, Q., Ding, L., Liu, J., Wang, C., Qu, G., Jiang, G., 2010.** Presence and partitioning behavior of polyfluorinated iodine alkanes in environmental matrices around a fluorochemical manufacturing plant: another possible source for perfluorinated carboxylic acids? *Environmental science & technology* 44, 5755–5761.
- Ruyle, B.J., Pickard, H.M., LeBlanc, D.R., Tokranov, A.K., Thackray, C.P., Hu, X.C., Vecitis, C.D., Sunderland, E.M., 2021.** Isolating the AFFF signature in coastal watersheds using oxidizable PFAS precursors and unexplained organofluorine. *Environmental Science & Technology* 55, 3686–3695.
- Schellenberger, S., Liagkouridis, I., Awad, R., Khan, S., Plassmann, M., Peters, G., Benskin, J.P., Cousins, I.T., 2022.** An outdoor aging study to investigate the release of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from functional textiles. *Environmental Science & Technology* 56, 3471–3479.
- Schulz, K., Silva, M.R., Klaper, R., 2020.** Distribution and effects of branched versus linear isomers of PFOA, PFOS, and PFHxS: a review of recent literature. *Science of the Total Environment* 733, 139186.
- Siao, P., Tseng, S.-H., Chen, C.-Y., 2022.** Determination of perfluoroalkyl substances in food packaging in Taiwan using ultrasonic extraction and ultra-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry. *Journal of Food and Drug Analysis* 30, 11.
- Sim, W., Park, H., Yoon, J.-K., Kim, J.-I., Oh, J.-E., 2021.** Characteristic distribution patterns of perfluoroalkyl substances in soils according to land-use types. *Chemosphere* 276, 130167.
- Song, D., Qiao, B., Yao, Y., Zhao, L., Wang, X., Chen, H., Zhu, L., Sun, H., 2023.** Target and nontarget analysis of per-and polyfluoroalkyl substances in surface water, groundwater and sediments of three typical fluorochemical industrial parks in China. *Journal of Hazardous Materials* 460, 132411.

- Stults, J.F., Higgins, C.P., Helbling, D.E.**, 2023. Integration of Per-and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) Fingerprints in Fish with Machine Learning for PFAS Source Tracking in Surface Water. *Environmental Science & Technology Letters*.
- Sun, M., Arevalo, E., Strynar, M., Lindstrom, A., Richardson, M., Kearns, B., Pickett, A., Smith, C., Knappe, D.R.**, 2016. Legacy and emerging perfluoroalkyl substances are important drinking water contaminants in the Cape Fear River Watershed of North Carolina. *Environmental science & technology letters* 3, 415–419.
- Taniyasu, S., Yamashita, N., Yamazaki, E., Rostkowski, P., Yeung, L.W.Y., Kurunthachalam, S.K., Kannan, K., Loganathan, B.G.**, 2015. Contamination profiles of perfluorinated chemicals in the inland and coastal waters of Japan following the use of fire-fighting foams, in: *Water Challenges and Solutions on a Global Scale*. ACS Publications, pp. 221–244.
- Trier, X., Granby, K., Christensen, J.H.**, 2011. Polyfluorinated surfactants (PFS) in paper and board coatings for food packaging. *Environmental Science and Pollution Research* 18, 1108–1120.
- Van Der Veen, I., Schellenberger, S., Hanning, A.-C., Stare, A., De Boer, J., Weiss, J.M., Leonards, P.E.**, 2022. Fate of per-and polyfluoroalkyl substances from durable water-repellent clothing during use. *Environmental Science & Technology* 56, 5886–5897.
- Venkatesan, A.K., Halden, R.U.**, 2013. National inventory of perfluoroalkyl substances in archived US biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey. *Journal of hazardous materials* 252, 413–418.
- Wang, Z., Cousins, I.T., Berger, U., Hungerbühler, K., Scheringer, M.**, 2016. Comparative assessment of the environmental hazards of and exposure to perfluoroalkyl phosphonic and phosphinic acids (PFPA and PFPIAs): current knowledge, gaps, challenges and research needs. *Environment international* 89, 235–247.
- Wang, Z., Cousins, I.T., Scheringer, M., Buck, R.C., Hungerbühler, K.**, 2014. Global emission inventories for C4–C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, Part I: production and emissions from quantifiable sources. *Environment international* 70, 62–75.
- Whitehead, H.D., Venier, M., Wu, Y., Eastman, E., Urbanik, S., Diamond, M.L., Shalin, A., Schwartz-Narbonne, H., Bruton, T.A., Blum, A.**, 2021. Fluorinated compounds in North American cosmetics. *Environmental Science & Technology Letters* 8, 538–544.
- Williams, J.T.**, 2017. *Waterproof and water repellent textiles and clothing*. Woodhead Publishing.
- Ye, F., Zushi, Y., Masunaga, S.**, 2015. Survey of perfluoroalkyl acids (PFAAs) and their precursors present in Japanese consumer products. *Chemosphere* 127, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.026>
- Zabaleta, I., Bizkarguenaga, E., Bilbao, D., Etxebarria, N., Prieto, A., Zuloaga, O.**, 2016. Fast and simple determination of perfluorinated compounds and their potential precursors in different packaging materials. *Talanta* 152, 353–363.

- Zabaleta, I., Blanco-Zubiaguirre, L., Baharli, E.N., Olivares, M., Prieto, A., Zuloaga, O., Elizalde, M.P., 2020.** Occurrence of per-and polyfluorinated compounds in paper and board packaging materials and migration to food simulants and foodstuffs. *Food chemistry* 321, 126746.
- Zhang, X., Lohmann, R., Dassuncao, C., Hu, X.C., Weber, A.K., Vecitis, C.D., Sunderland, E.M., 2016.** Source attribution of poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) in surface waters from Rhode Island and the New York Metropolitan Area. *Environmental science & technology letters* 3, 316–321.
- Zhang, Z., Sarkar, D., Biswas, J.K., Datta, R., 2022.** Biodegradation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *Bioresource technology* 344, 126223.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses**
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr