

La pollution aux PFAS : état des lieux des connaissances et enjeux de société

Résumé exécutif	1
Introduction	2
Les PFAS, une famille de molécules très diverses, omniprésentes dans notre vie quotidienne.	3
<i>Présentation de la famille des PFAS.</i>	3
<i>Encart : L'utilisation du fluor en médecine : médicaments, dispositifs médicaux et imagerie.</i>	4
<i>Mieux comprendre les propriétés des PFAS à l'aide de la chimie.</i>	5
Détection et mesure des PFAS : les données scientifiques actuelles.	7
<i>Les méthodes analytiques actuelles permettant l'étude des PFAS.</i>	8
<i>Présence des PFAS dans les milieux et exposition humaine.</i>	9
<i>Encart : le cas du TFA</i>	11
Décontamination : quelles solutions ?	11
<i>Des possibilités de recyclage extrêmement limitées et réservées à certaines filières.</i>	11
<i>Les voies de décontamination envisagées et leur degré de maturité.</i>	11
Les industriels et les usages face à la nécessaire évolution des normes.	12
<i>Point sur les usages et leurs alternatives.</i>	12
Imprégnation des populations humaines et évaluation de la toxicité des PFAS.	15
<i>Imprégnation des populations humaines par les PFAS, cas de la France.</i>	15
<i>Point sur les connaissances de la toxicité des PFAS sur la santé humaine.</i>	16
<i>Que reste-t-il à savoir de la toxicité des PFAS sur la santé humaine ?</i>	17
Conclusion et recommandations	19
<i>Recommandation 1 : Transparence – La traçabilité des PFAS doit devenir la règle.</i>	19
<i>Recommandation 2 : Contrôle – Tout rejet de PFAS dans l'environnement, en particulier en aval des sites de production industrielle, doit être strictement interdit.</i>	19
<i>Recommandation 3 : Connaissance – Les efforts de recherche sur la détection, la caractérisation et l'évaluation des effets des PFAS sur la santé et l'environnement doivent être intensifiés.</i>	20
<i>Recommandation 4 : Substitution – Un grand plan de recherche public et privé doit être lancé pour remplacer les PFAS.</i>	20
<i>Recommandation 5 : Remédiation – Des méthodes efficaces pour éliminer les PFAS des milieux contaminés doivent être développées.</i>	20
Annexes	22
<i>Auditions : les experts entendus par le GT</i>	22
<i>Bibliographie complète</i>	22
<i>Liste des figures et des tableaux</i>	23
<i>Liste des acronymes et symboles</i>	24

Résumé exécutif

Les substances per- et polyfluoroalkylées, désormais bien connues du grand public sous l'acronyme anglais PFAS, ou leur qualificatif de « polluants éternels », regroupent un large éventail de molécules aux propriétés uniques. Leur persistance et la mobilité de certaines d'entre elles, combinées à des décennies d'utilisation généralisée dans les processus industriels, les mousses anti-incendie et les produits de consommation, ont entraîné leur présence dans tous les milieux, et leur accumulation dans le corps humain et dans les organismes au sein des chaînes alimentaires.

Aujourd'hui, les PFAS font régulièrement la une, tant dans la presse généraliste que spécialisée, en raison de leurs effets potentiels ou avérés sur la santé. Cette attention médiatique de la contamination des milieux et de l'imprégnation des populations humaines permet une prise de conscience sociale et une évolution des normes et des réglementations. En France, une loi vient d'être adoptée, visant à interdire ces composés dans un nombre limité de produits et à instaurer une redevance pour les industriels responsables des rejets.

Dans ce contexte, le présent rapport vise à faire le tri entre les éléments scientifiques avérés et ceux non établis afin de dresser un état des lieux solide sur les connaissances scientifiques disponibles sur ces molécules. Au moyen de l'audition d'experts incontestés des domaines de l'écotoxicologie, l'épidémiologie, la chimie de l'environnement et la chimie analytique, et d'une étude poussée de la bibliographie scientifique disponible, l'Académie des sciences fournit ici son analyse et énonce plusieurs recommandations.

Ce rapport souligne la complexité inédite de la pollution aux PFAS, qui dépasse, au moins sous certains aspects, les grands épisodes de pollution environnementale passée (notamment hydrocarbures, métaux lourds). Contrairement à ces derniers, la pollution aux PFAS apparaît comme extrêmement diffuse et difficilement réversible, faute de remédiation réaliste à grande échelle à ce jour. Par ailleurs, certains usages des PFAS restent encore non substituables et, en particulier, la transition énergétique en dépend.

Face aux enjeux sanitaires et environnementaux, des efforts conséquents de recherche sont nécessaires pour mieux comprendre les effets de ces molécules, dont la diversité est considérable et les propriétés très variées. Il est essentiel d'identifier des solutions de substitution et de développer des méthodes de remédiation efficaces. En attendant ces avancées, il est impératif d'assurer un suivi précis de la présence et du devenir des PFAS. Leur émission dans l'environnement doit être totalement interdite.

Cette réflexion conduit l'Académie des sciences à souligner l'importance d'une approche plus large des expositions chimiques. Ce rapport constitue ainsi une première étape vers une étude approfondie de « l'exposome chimique », qui fera l'objet d'un travail spécifique à destination du grand public et des décideurs.

Introduction

PFAS. Cet acronyme anglais se traduit en français par « substances per- et polyfluoroalkylées » et désigne une très vaste famille de molécules organofluorées synthétiques, dont les contours sont encore mouvants selon les références. Quelle que soit la définition retenue, notons que toutes ces molécules sont d'origine humaine et présentent la particularité de comporter un ou plusieurs groupements carbone-fluor, dont la liaison est extrêmement stable et à l'origine de propriétés chimiques remarquables.

Nous retiendrons, pour ce qui suit, la définition fournie par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)¹, qui décrit les PFAS comme des molécules formées d'une chaîne d'atomes de carbone plus ou moins longue, linéaire, ramifiée ou cyclique, et contenant au moins un groupe méthyle perfluoré (-CF₃) ou un groupe méthylène perfluoré (-CF₂-)². Cette définition englobe une grande diversité de molécules formant un groupe loin d'être homogène, comme cela sera détaillé plus avant. Parmi elles, celles dotées d'un groupement polaire³ recevront, dans ce rapport, une attention particulière.

Les propriétés chimiques des PFAS (ces espèces sont stables sous de fortes chaleurs, imperméables, repoussent les graisses et ont des propriétés antitaches ou antiadhésives), qui leur permettent d'assurer des fonctions variées, devenues rapidement fort utiles, pour ne pas dire indispensables, à l'industrie et à notre vie quotidienne, expliquent leur utilisation massive depuis les années 1950.

Mais leurs qualités exceptionnelles pour l'industrie et la vie quotidienne se traduisent aussi par des risques notables. Comme présenté en figure 1, les préoccupations internationales concernant les effets potentiels sur la santé associés à l'exposition aux PFAS ont commencé au début des années 2000, lorsque la présence de PFOS (sulfonate de perfluorooctane) a été détectée dans le sang des ours polaires de l'Arctique et de la faune d'autres régions éloignées des zones d'activités humaines. Depuis lors, les recherches se sont étendues à d'autres PFAS, et en particulier aux désormais très étudiés PFOA (acide perfluorooctanoïque), PFHxS (sulfonate de perfluorohexane) et PFHxA (acide perfluorohexanoïque).

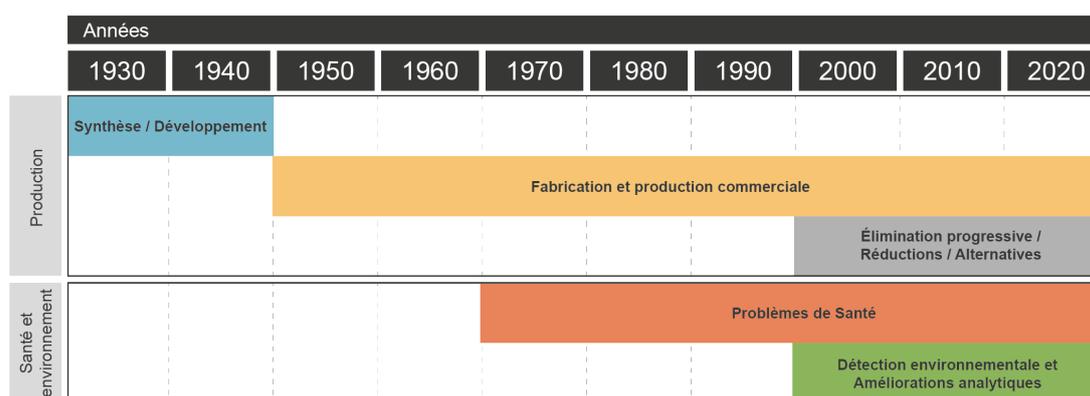


Figure 1 : Les grandes phases de l'émergence des PFAS et de la sensibilisation associée⁴.

¹ Les contours de ce groupe ne font pas encore l'objet d'un consensus scientifique. La définition de l'OCDE est la plus couramment employée et sera retenue dans ce rapport.

² Notons ainsi que toutes les molécules fluorées ou organofluorées ne sont pas des PFAS.

³ Une **molécule polaire** est une molécule dont la répartition des charges électriques n'est pas uniforme.

⁴ Traduit d'après le site Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC)- [PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances](#). Consulté le 20 février 2025

Très difficilement dégradables, les PFAS s'accumulent dans tous les compartiments de l'environnement et dans les organismes humains, soulevant une problématique de santé publique et environnementale à considérer avec sérieux. Les études concernant ces molécules, leurs sources, leurs devenir et leurs effets se multiplient. Actuellement, en France, pas une semaine ne passe sans que les PFAS ne fassent parler d'eux et de leurs méfaits potentiels ou avérés sur la santé dans la presse généraliste ou dans la littérature scientifique. L'Académie des sciences vise, par ce rapport, à faire le tri entre les éléments scientifiques avérés et ceux non établis, aux moyens de l'audition d'experts incontestés des domaines de l'écotoxicologie, l'épidémiologie, la chimie de l'environnement et la chimie analytique et d'une étude poussée de la bibliographie disponible.

Après avoir présenté cette famille de molécules et détaillé les connaissances disponibles sur leurs propriétés, ce rapport examine les méthodes actuelles de détection et de mesure, ainsi que les solutions de décontamination. Il propose ensuite une synthèse des connaissances sur l'imprégnation des populations humaines et ses conséquences en matière de santé publique et d'environnement.

Les PFAS, une famille de molécules très diverses, omniprésentes dans notre vie quotidienne.

Présentation de la famille des PFAS.

Des molécules aux multiples usages. Bon nombre d'usages des PFAS sont largement documentés⁵ et la figure 2 en présente quelques exemples. Il est désormais bien connu du grand public que ces molécules sont présentes dans une grande variété de produits du quotidien, comme les textiles aux propriétés imperméabilisantes et déperlantes (ex. : Gore-Tex™), les emballages alimentaires jetables, les ustensiles et revêtements culinaires (ex. : Teflon™), les cosmétiques, les produits de nettoyage, les moquettes, les lubrifiants, ainsi que dans l'industrie automobile, en particulier dans les batteries au lithium. Elles sont aussi utilisées dans l'aéronautique, les matériaux anti-incendie, les mousses ignifuges destinées à l'extinction des incendies, les traitements antitaches et imperméabilisants, ainsi que dans certains produits phytosanitaires.

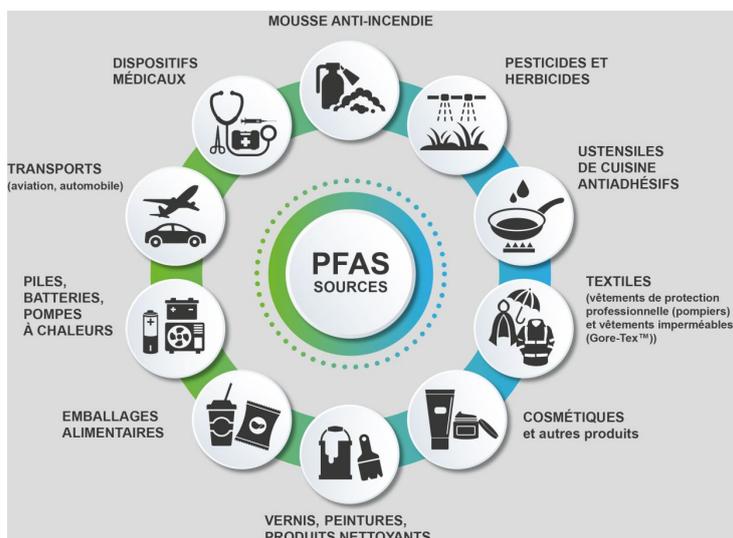


Figure 2 : Quelques exemples de sources de PFAS issues de nos vie quotidienne ou d'usage industriel et professionnel⁶.

⁵ Pour un aperçu des usages, cf. Glüge J. *et al.* An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) *Environ. Sci.: Processes Impacts* (2020), 22, 2345. DOI: [10.1039/d0em00291g](https://doi.org/10.1039/d0em00291g)

⁶ Traduit et modifié d'après <https://www.tetrachteurope.com/the-impacts-of-forever-chemicals-on-real-estate-transactions/>

Le tableau 1 fait état de quelques propriétés et exemples d'utilisation de PFAS « médiatiques ».

Acronyme	Nom complet	Exemples de propriétés et d'utilisations
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	Utilisé dans la fabrication de revêtements antiadhésifs (ex. Teflon™)
PFOS	Sulfate de perfluorooctane	Présent dans les mousses anti-incendie, les textiles aux propriétés hydrofuges et les produits de nettoyage
PFNA	Acide perfluorononanoïque	Utilisé dans certains revêtements industriels et dans la fabrication de polymères
PFHxS	Sulfate de perfluorohexane	Utilisé dans des traitements hydrofuges pour les textiles et les tapis
GenX	Nom commercial du 2,3,3,3-tetrafluoro (heptafluoropropoxy)propanoate d'ammonium et sa forme acide	Substitut chimique moderne du PFOA dans la fabrication de fluoropolymères haute performance
PFBA	Acide perfluorobutyrique	Utilisé dans les produits agricoles et dans certaines applications médicales

Tableau 1 : Quelques PFAS, leurs propriétés et exemples d'utilisations.

Des molécules omniprésentes mais invisibilisées. Les PFAS sont utilisés dans de nombreuses catégories de produits, très souvent, pour ne pas dire systématiquement, sans même que l'utilisateur ou l'industriel qui les manipule ne puisse en avoir connaissance, faute de normes contraignant à l'obligation d'explicitation de leur présence. Les sources d'émissions de PFAS et d'exposition des populations humaines et des milieux sont multiples (cf. figure 3), ce qui fera l'objet d'un chapitre de ce rapport. Des initiatives rigoureuses⁷ existent pour rendre compte de leur présence dans les produits de notre quotidien et nous proposer des conseils sur la manière de les éliminer progressivement, dans la mesure des alternatives existantes qui restent aujourd'hui peu nombreuses, nous y reviendrons.

Un seul acronyme pour une large famille de molécules chimiquement diverses. Selon la définition retenue par l'OCDE, adoptée dans ce rapport, la famille des PFAS est particulièrement vaste. Le nombre de molécules qu'elle contient pourrait se situer entre 4 000 et 20 000 selon les estimations, probablement autour de 12 000, dont beaucoup restent encore à identifier. Il s'agit d'un ensemble de substances distinctes aux structures et propriétés très différentes : des composés de poids moléculaire élevé ou faible ; des molécules neutres, et d'autres chargées (anions ou cations) ; des solides, des liquides et des gaz. Certaines de ces substances partagent la propriété étonnante d'être à la fois solubles dans l'eau et dans les graisses, certaines peuvent également être volatiles, leur degré de solubilité et de volatilité dépendant de leur nature. Dans l'environnement, certains PFAS sont mobiles et d'autres immobiles, certains sont bioaccumulables alors que d'autres le sont peu, voire pas.

Encart : L'utilisation du fluor en médecine : médicaments, dispositifs médicaux et imagerie.

Tout ce qui contient du fluor n'est pas PFAS. En particulier, la famille des composés organofluorés inclut un certain nombre de médicaments qui peuvent être ou non des PFAS au sens de l'OCDE. Parmi eux, de nombreux médicaments sont essentiels à la santé publique et, dans bien des cas, ne disposent d'aucune alternative thérapeutique viable. L'utilisation d'atomes de fluor pour moduler l'activité pharmacologique a commencé dans les années 1950 et, parmi les deux premières molécules historiques, figure le 5-fluorouracile, un médicament antitumoral encore très largement utilisé dans le traitement de nombreux cancers. Depuis ces travaux initiaux, des centaines de médicaments

⁷ Cf. par exemple : ChemSec -PFAS Guide, [PFAS Guide - Find PFAS chemicals in your products](#)

contenant des liaisons carbone-fluor ont été synthétisés et sont devenus des éléments essentiels de l'arsenal thérapeutique⁸ : il s'agit d'antibiotiques, d'antiviraux, d'hypocholestérolémiants, d'antidépresseurs ou encore d'anti-inflammatoires. La fluoration des molécules joue un rôle clé dans l'optimisation de l'efficacité thérapeutique : elle permet non seulement d'améliorer l'activité pharmacologique, mais aussi, dans certains cas, de réduire la toxicité et les effets secondaires.

Par ailleurs, de nombreux dispositifs médicaux contiennent ou utilisent du fluor sans substitut possible (ex. cathéters, prothèses, fluoropolymères et gaz fluorés des pompes et ventilateurs).

Enfin, en imagerie médicale, la RMN du ¹⁹F s'est largement développée au cours des vingt dernières années et est devenue une méthode puissante. L'isotope radioactif du fluor (¹⁸F) est, quant à lui, utilisé dans la tomographie par émission de positron (PET-scan) pour l'imagerie tumorale au ¹⁸F-fluorodésoxyglucose (ou ¹⁸F-FDG), avec un grand nombre d'indications potentielles en cancérologie.

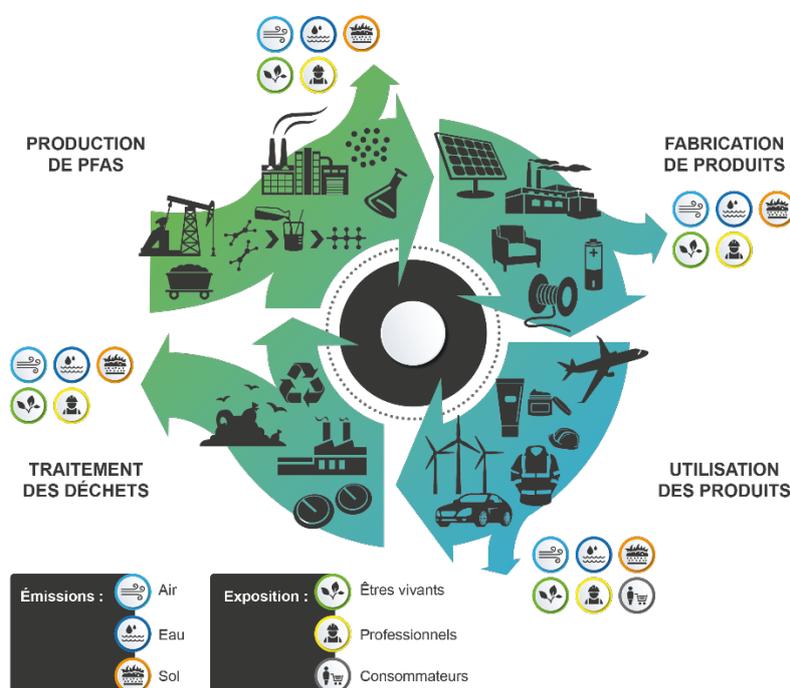


Figure 3 : Les sources d'émissions et d'exposition aux PFAS⁹.

Mieux comprendre les propriétés des PFAS à l'aide de la chimie.

Deux grandes catégories de PFAS peuvent être distinguées : les polymères et les non-polymères, ces derniers étant, d'après la bibliographie disponible¹⁰, les plus communément détectés dans l'environnement.

Longueur de la chaîne carbonée et persistance des PFAS. En première approximation, l'on considère que la longueur de la chaîne carbonée conditionne la persistance des PFAS dans le milieu : plus elle est longue plus la molécule persiste longtemps dans l'environnement où elle est émise. En réalité,

⁸ 360 produits pharmaceutiques organofluorés ont été approuvés et utilisés dans le monde depuis les années 1950, comme le Prozac ou le Lipitor.

⁹ Traduit et modifié d'après European Environment Agency (EEA).

¹⁰ Notamment cf. la synthèse produite par Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC)- [PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances](#). Site consulté en 20 Février 2025

c'est vraisemblablement plus complexe, et dépendant de plusieurs facteurs, dont le nombre de liaison carbone-fluor (C-F), et de son "effet bouclier" développé ci-après, sans que l'on puisse être plus précis à ce jour, faute de données. Notons que l'adjectif « persistant » apparaît bien plus approprié que le qualificatif « éternel », fréquemment attribué à cette famille de composés, dans la mesure où, bien que dotés d'une grande stabilité, les PFAS peuvent être dégradés, comme nous le verrons plus avant.

Le fluor, un très fort attracteur d'électrons. Le fluor est l'élément chimique le plus électronégatif, autrement dit, le plus fort attracteur d'électrons des éléments chimiques. Il en résulte que la liaison chimique C-F est la plus forte des liaisons simples que le carbone peut former avec tout autre élément du tableau périodique, et une liaison de ce type est encore renforcée par la présence de liaisons C-F voisines. Cette force de liaison se traduit par la grande quantité d'énergie qu'il faut fournir pour la rompre¹¹ : il est particulièrement difficile de transformer des systèmes fluorés en d'autres systèmes chimiques plus stables et on comprend ainsi que ces molécules résistent particulièrement bien aux hautes températures comme aux dégradations microbiennes.

L'effet bouclier des groupements perfluorés. Un groupement perfluoré, ainsi chargé négativement au niveau des fluors, forme un « bouclier » s'opposant à l'approche d'autres molécules, surtout si elles sont riches en électrons. Les systèmes chimiques pauvres en électron (de charge positive) ne sont que très peu attirés par ce bouclier fluoré, même si les interactions électrostatiques sont favorables en raison de la très faible polarisabilité de la liaison C-F. Cette propriété, qui mesure la capacité d'une liaison à être influencée par son environnement, est essentielle dans les interactions entre molécules. Par ailleurs, la rigidité des PFAS due à la répulsion entre fluors contribue à diminuer les interactions. Il en résulte que les parties fluorées des PFAS n'interagissent que très peu avec leur environnement. Ces très faibles interactions (dites de van der Waals) se traduisent par une affinité privilégiée avec l'air plutôt qu'avec la phase liquide pour un bon nombre de PFAS neutres. Il a aussi été noté que les PFAS en solution ont tendance à se rassembler sous l'effet d'une attraction entre fluors (fluorophilicité). Cependant, l'augmentation de la polarité de ces PFAS non chargés contrôlée par la nature du groupement chimique en bout de chaîne augmente leur présence dans la phase liquide et notamment dans l'eau¹² (*cf. infra*).

Diversité des molécules et de leurs propriétés. Les propriétés des PFAS sont fortement influencées par la nature du groupe chimique non fluoré présent en bout de chaîne. Ce groupe, généralement polaire, définit les propriétés et donc l'usage des PFAS qui les portent. Ces têtes polaires sont notamment responsables des interactions avec d'autres systèmes chimiques et donc des propriétés de ces molécules. En particulier, ce sont elles qui confèrent à certains PFAS, notamment ioniques, des propriétés de surfactants, c'est-à-dire la capacité à s'accumuler aux interfaces entre des substances aqueuses et non-aqueuses. Notons que la solubilité dans l'eau des PFAS est fortement dépendante de la nature de la tête polaire. Par ailleurs, les PFAS peuvent former des micelles mais apparemment pas à des concentrations trouvées dans l'environnement.

Les molécules avec des chaînes aliphatiques de carbone entièrement fluorées sont des substances perfluoroalkylées, tandis que les substances polyfluoroalkylées sont celles dans lesquelles il reste des liaisons carbone-hydrogène (C-H). Notons que la présence de liaison C-H ou de toute liaison autre

¹¹ L'énergie de la rupture homolytique de la liaison C-F est de 116 kcal/mol au lieu de 90-95 kcal/mol pour une liaison C-H par exemple.

¹² *Cf. Endo S. et al. Experimental Determination of Air/Water Partition Coefficients for 21 Per- and Polyfluoroalkyl Substances Reveals Variable Performance of Property Prediction Models. Environ. Sci. Technol. (2023), 57, 22, 8406-8413 <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02545>*

qu'avec le fluor crée un point de faiblesse dans le système chimique qui deviendrait plus facile à détruire.

Les acides perfluoroalkyles comprennent notamment les acides perfluoroalkyles carboxyliques (ex. : PFOA), sulfoniques (ex. : PFOS) ou phosphoniques, qui se distinguent par leurs groupes fonctionnels (cf. tableau 1 et figure 4).

Exemples de molécules perfluorées : ci-dessus du haut vers le bas PFOS ($C_8F_{17}SO_3H$ ou $C_8F_{17}SO_3^-$) et PFOA ($C_8F_{15}COOH$ ou $C_8F_{15}CO_2^-$) : les atomes de fluor sont attachés à tous les sites de liaison possible, (la molécule est dite perfluorée), la différence réside dans le groupe fonctionnel situé au niveau de la « tête ».

Exemple de molécule polyfluoroalkyle : certains atomes de carbone restent liés à des atomes d'hydrogène.

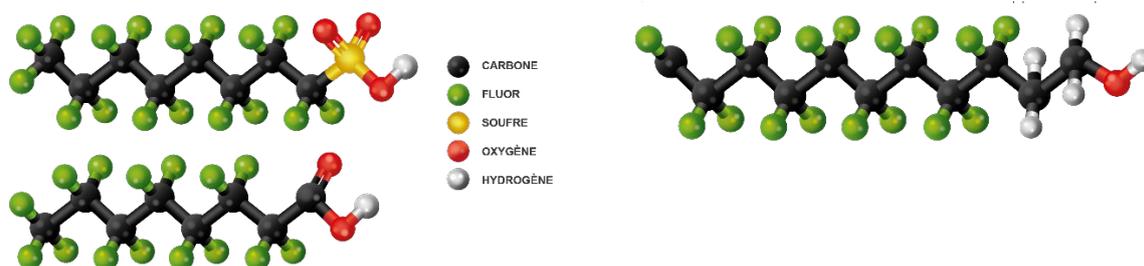


Figure 4 : Structure moléculaire de quelques molécules per- (à gauche) ou poly- (à droite) alkylées.

Longueur de chaîne et solubilité des PFAS. Des études expérimentales et théoriques¹³ montrent que la longueur de la chaîne fluorée joue un rôle important dans la solubilité du PFAS. Pour les PFAS à chaîne fluorée courte, la partie polaire fonctionnelle anionique domine et le PFAS est soluble dans l'eau. Lorsque la chaîne fluorée s'allonge, le PFAS se retrouve préférentiellement en surface, sa chaîne fluorée sortant hors de l'eau et la partie fonctionnelle restant dans l'eau. Toutes les études établissent que les PFAS à courte chaîne sont plus difficiles à filtrer et à extraire de l'eau. Le cation joue aussi un rôle mais les tendances ne sont pas décrites.

De ces premières propriétés découlent leur persistance dans l'environnement qui leur vaut le qualificatif de « polluants éternels », mais qui est exagéré comme nous l'avons souligné plus haut. Il est également important de noter dès à présent que la diversité de propriétés au sein de cette famille de molécules se traduit par des comportements très différents. Nous y reviendrons.

La partie suivante vise à faire le point sur les méthodes et capacités actuelles de détection de ces molécules dans nos environnements.

Détection et mesure des PFAS : les données scientifiques actuelles.

Bien que certains PFAS soient produits depuis les années 1950, leur présence dans l'environnement n'a été véritablement documentée qu'à partir du début des années 2000 (cf. figure 1), à la faveur du développement des méthodes de détection. Les premières recherches se sont principalement

¹³ Les études théoriques sur ces systèmes sont très récentes. Elles sont de deux types. D'un côté, les études de dynamique moléculaire visent à mieux comprendre les propriétés macroscopiques, d'interaction avec l'environnement (solvant) et la formation d'agrégats. Les calculs sont basés sur des paramétrages validés par ailleurs. De l'autre, des calculs récents, basés sur la chimie quantique, tentent d'évaluer les interactions au niveau des atomes. Une grande précision nécessaire dans ces calculs est très difficile à obtenir. L'atome de fluor, très riche en électrons, a toujours présenté un défi important pour la modélisation théorique.

concentrées sur les rejets majeurs des sites de fabrication et les zones d'utilisation intensive, comme les sites d'application de mousses anti-incendie.

Les méthodes analytiques actuelles permettant l'étude des PFAS.

Les propriétés physiques et chimiques qui confèrent aux PFAS persistance et mobilité dans l'environnement les rendent également particulièrement difficiles à analyser et à extraire des milieux. Les technologies analytiques modernes disponibles permettent d'identifier et de quantifier moins d'une centaine de PFAS (sur les milliers existants) mais cette liste continue de s'allonger grâce aux progrès dans ce domaine.

Pour évaluer l'ensemble de la contamination aux produits fluorés, la mesure du fluor total est une approche courante et différentes techniques sont utilisées à cet effet¹⁴.

L'identification précise des PFAS repose sur des stratégies développées pour les composés organiques, notamment le couplage de la chromatographie en phase liquide à haute performance et de la spectrométrie de masse en tandem (HPLC-MS/MS). Cette combinaison permet de séparer les composés et de déterminer leur masse, facilitant ainsi leur identification. Diverses améliorations et nouvelles techniques renforcent la capacité de discrimination et repoussent les limites de détection aidant ainsi à l'identification des PFAS.

Malgré des stratégies analytiques bien établies pour le dosage des composés organiques dans différentes matrices environnementales, la détection et la quantification des PFAS restent un véritable défi. Leur grand nombre, leur métabolisation – bien que limitée nous l'avons souligné – et les difficultés liées aux étapes amont de l'analyse (échantillonnage et stockage des échantillons¹⁵) compliquent leur évaluation. Ainsi, il est aujourd'hui admis que les concentrations de PFAS actuellement rapportées dans l'environnement sont souvent sous-estimées.

Aujourd'hui, les PFAS « historiques » et reconnus comme toxiques (*cf. infra*), tels que le PFOA et le PFOS, font l'objet d'une attention particulière et d'une caractérisation systématique. Notons néanmoins qu'une étude canadienne récente de la pollution aux PFAS menée dans la banlieue sud de Lyon a permis de quantifier, de façon beaucoup plus large et assez remarquable, la concentration de 77 PFAS différents¹⁶.

La diversité des molécules à analyser (plusieurs milliers) et le coût des recherches limitent encore l'accès à une connaissance exhaustive des PFAS. Détecter des espèces chimiques inconnues est complexe, et obtenir des mesures quantitatives précises nécessite l'établissement d'une base de référence rigoureuse sur des composés identifiés. L'utilisation de plusieurs méthodes physiques en parallèle et l'adoption de protocoles d'analyse stricts sont indispensables. Enfin, la très faible concentration de ces substances, souvent proche du seuil de détection, constitue un défi supplémentaire. Un effort important est nécessaire pour améliorer la chaîne de détection et garantir la mise en place de normes basées sur des données fiables.

¹⁴Par exemple, la spectrométrie d'absorption moléculaire en four graphite à source continue haute résolution (HR-CS GF MAS) permet de détecter le fluor total (TF) via la formation *in situ* de molécules de fluorure de gallium(I) (GaF). Pour en savoir plus, La gazette du laboratoire - <https://www.gazettelabo.fr/galerie/4180ANALYTIK-JENA-dosage-fluor.html>

¹⁵ Les difficultés d'analyses découlent aussi des étapes d'échantillonnage et notamment de la conservation des échantillons car le matériel de collecte et de traitement des échantillons au laboratoire peut lui-même contenir des PFAS et être à l'origine de contaminations. Pour cause : le succès des PFAS n'épargne pas les laboratoires, où les flacons de prélèvements ou de stockage, tout autre plastique ou encore les filtres peuvent contenir des PFAS, dont l'utilisation peut contaminer les échantillons étudiés et sont ainsi susceptibles d'interférer avec leur détection en LC-MS/MS.

¹⁶*Cf. Teymoorian T et al. Target and Suspect Screening Reveal PFAS Exceeding European Union Guideline in Various Water Sources South of Lyon, France. Environmental Science & Technology Letters. (2025). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c01126>*

Présence des PFAS dans les milieux et exposition humaine.

L'exposition aux PFAS peut survenir au cours des différentes étapes de leur cycle de vie. Le cycle de vie des PFAS commence par leur synthèse à partir de précurseurs. Ces substances sont ensuite intégrées dans divers processus industriels ou commerciaux pour fabriquer des produits de consommation contenant ou traités avec des PFAS. Tout au long du cycle de vie, ces composés peuvent être libérés dans l'environnement par les déchets industriels, les émissions accidentelles, l'usure des produits ou encore l'élimination des matériaux contaminés. Une partie importante des volumes de PFAS produits industriellement sont des huiles et des polymères (comme le Téflon™), qui ne sont pas polaires : très peu solubles, peu ou pas transportées par l'eau, ces molécules ne diffusent que très peu dans l'environnement et s'accumulent localement si elles sont rejetées. Leur gestion pose moins de défis que celles des molécules possédant une fonction polaire et qui, plus solubles, peuvent être transportées dans l'eau sur de grandes distances, générant une pollution très diffuse.

Par ailleurs, dans certains cas, comme les mousses anti-incendie, leur utilisation entraîne un rejet direct dans l'environnement. Les PFAS se retrouvent également dans les effluents et les boues des stations d'épuration, ces dernières pouvant être largement utilisées comme épandage agricole.

L'exposition humaine aux PFAS peut survenir de plusieurs façons (cf. figure 5) :

- (1) Par un contact direct au cours de leur fabrication,
- (2) Par une utilisation professionnelle ou intensive de matériaux en contenant, c'est le cas notamment des pompiers, exposés par l'utilisation des mousses anti-incendie et leurs combinaisons ignifugées,
- (3) Par l'usage ou le contact avec des produits traités aux PFAS,
- (4) Par l'exposition à des milieux environnementaux contaminés.

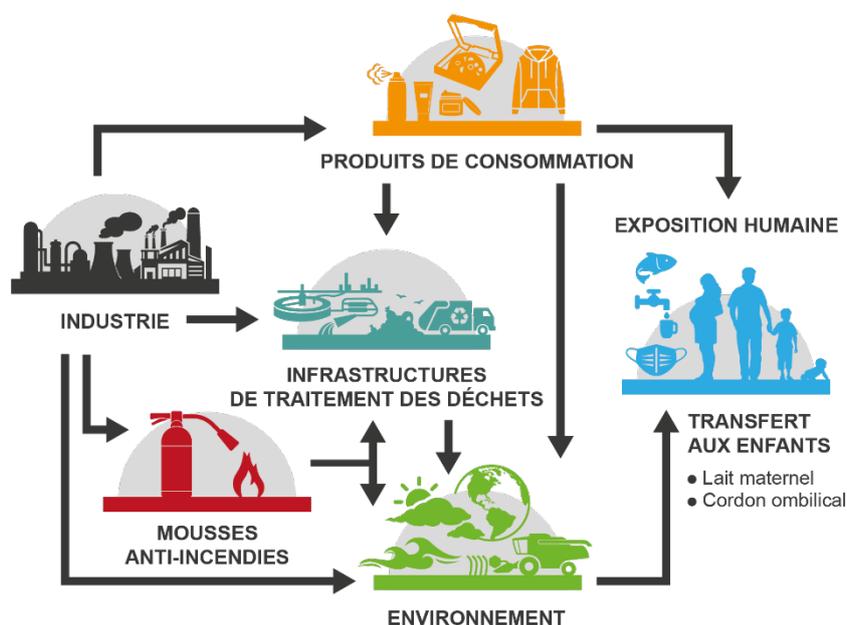


Figure 5 : Vue d'ensemble des voies d'exposition aux PFAS pour différentes populations humaines en dehors des milieux professionnels¹⁷.

¹⁷Traduit et modifié d'après Sunderland E.M. *et al.* A Review of the Pathways of Human Exposure to Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) and Present Understanding of Health Effects. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2018 Nov 23;29(2):131-147. doi: [10.1038/s41370-018-0094-1](https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1).

Tous les milieux sont concernés par la présence de PFAS, à des niveaux variables. Le volume, la concentration et la composition des rejets varient selon la source, le processus impliqué et les mesures de contrôle environnemental mises en place. À l'échelle des écosystèmes, les PFAS sont détectés dans tous les compartiments structurant l'environnement des populations humaines : eaux de surface, nappes phréatiques, sols et animaux à différents niveaux des réseaux alimentaires.

Atmosphère et air ambiant. Les propriétés et la stabilité de ces composés leur permettent de résister à une dégradation par les UV dans l'atmosphère. Ils peuvent ainsi se disperser dans ses différentes strates et y circuler sur de très longues distances avant de se recondenser au niveau de points froids, tels que les sommets montagneux et essentiellement au niveau des très hautes latitudes.

Les méthodes existent pour détecter les PFAS dans l'air ambiant, en particulier dans les zones urbaines ou à proximité des sites industriels. Les PFAS volatils tels que les FTOHs (alcools fluorotétramères) se déplacent facilement dans l'atmosphère, tandis que d'autres, à faible pression de vapeur, s'adsorbent sur les particules d'aérosol. Les PFAS à chaîne courte ont tendance à migrer au cœur des particules aqueuses, et ceux à chaîne plus longue se fixent plutôt à leur surface. Des campagnes de mesure conduites entre 2017 et 2022 en Europe ont révélé les concentrations moyennes dans l'air ambiant de divers sites (elles varient entre 1 et 30 pg/m³ pour plus de 50 PFAS, voire plus de 100 pg/m³ dans les zones proches de sites industriels utilisant des PFAS¹⁸). Les concentrations dans l'air intérieur peuvent être beaucoup plus élevées¹⁹ en raison de la présence de PFAS dans les textiles, moquettes et emballages alimentaires.

Néanmoins, les méthodes de prélèvement et de réglementation n'étant pas normalisées et faute de seuil fixés par des normes ou d'études permettant d'établir des liens toxicologiques, ces données chiffrées brutes sont difficilement exploitables.

Masses d'eau. Dans une récente étude menée sur la qualité des masses d'eau européennes, l'*European Environment Agency*²⁰ a établi que le PFOS était présent dans la plupart d'entre elles, dans des concentrations supérieures aux seuils réglementaires visant à éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement. En particulier, d'après les données collectées pour la période 2018-2022, plus de la moitié des rivières et des zones d'estuaires dépassent les recommandations annuelles des normes EQS - *Environmental quality standards* - mises en place.

En France en particulier, de nombreuses régions situées à proximité de zones industrielles voient leurs eaux contaminées par les PFAS (vallée du Rhône²¹, bassin de l'Oise, Seine en aval de Paris), avec le PFOS comme composé majoritaire, tandis que les bases aériennes et militaires, grandes utilisatrices de mousses anti-incendie pour éteindre les feux d'hydrocarbures, constituent des points chauds de concentrations avec des valeurs supérieures à 100ng/L (seuil reconnu comme dangereux par les normes actuelles).

Le cas des eaux de boisson et de l'alimentation. Les études indiquent que l'eau potable constitue la principale source d'exposition aux PFAS pour les populations humaines. Il est encore difficile d'ob-

¹⁸ Par exemple, en Auvergne-Rhône-Alpes en 2025, des mesures ont montré des concentrations d'environ 10 pg/m³ dans l'air urbain de Lyon et plusieurs centaines de pg/m³ à Pierre-Bénite, proche de sites industriels.

¹⁹ Des mesures dans certains foyers ont montré des concentrations de PFOA et PFOS variant entre non détecté et 100 pg/m³, tandis que pour les FTOHs, les niveaux pouvaient atteindre entre 10 000 et 50 000 pg/m³, avec des concentrations encore plus élevées dans des sites industriels.

²⁰ Cf. le rapport de l'European Environment Agency (EEA): [PFAS pollution in European waters | European Environment Agency's home page](#). Rapport de décembre 2024.

²¹ Cf. Teymoorian T *et al.* Target and Suspect Screening Reveal PFAS Exceeding European Union Guideline in Various Water Sources South of Lyon, France. *Environmental Science & Technology Letters*. (2025). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c01126>

tenir des données sur les concentrations en PFAS dans les eaux du robinet ou embouteillées, néanmoins, celles mesurant la teneur en PFOA et PFOS en révèlent la présence dans la plupart des pays testés. Soulignons que la viande, les œufs et les produits de la mer représentent également une voie de contamination significative²².

Encart : le cas du TFA

Le TFA (acide trifluoroacétique) mérite une vigilance particulière : actuellement considéré comme étant la plus petite molécule appartenant à la famille des PFAS (chaîne ultra courte à deux atomes de carbone), ce composé fait l'objet de beaucoup d'attention dans les médias²³. Issu principalement de la dégradation de PFAS et notamment de pesticides et de fluides réfrigérants, il est le plus répandu et abondant dans l'environnement et, présent en faibles concentrations dans tous les réseaux hydrographiques, il est détectable dans les eaux minérales en bouteille.

La petite taille de sa chaîne ne place pas ce PFAS « émergent » parmi la liste des 20 PFAS préoccupants. Cependant, étant donné ses effets sur le foie et la reproduction des mammifères qui ont été récemment mis en évidence²⁴, et son caractère ubiquiste dans les milieux (les concentrations de TFA sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur à celles des autres substances per- et polyfluoroalkylées), il paraît nécessaire de prendre des mesures pour réduire ses émissions ainsi que celles de ses précurseurs²⁵. Pour l'heure, seuls quelques pays européens, tels que les Pays-Bas, ont réglementé sa présence à l'aide d'une valeur seuil autorisée dans l'eau.

Décontamination : quelles solutions ?

Étant donné le large éventail des applications et des produits dans lesquels ces composés sont ou ont été utilisés, les voies d'entrée dans l'environnement sont diffuses et nombreuses : effluents des stations d'épuration d'eaux usées, lixiviation des décharges, pertes dans l'atmosphère pendant la combustion, lessivage de mousses anti-incendie, ou encore émissions en lien avec l'usure des matières traitées (cf. figure 5). La décontamination des milieux représente un défi considérable.

Des possibilités de recyclage extrêmement limitées et réservées à certaines filières.

Ces molécules sont généralement présentes en très faibles concentrations et, le plus souvent, en mélanges. La séparation des différents PFAS à cette échelle est généralement impossible, ce qui empêche leur recyclage.

Notons que, pour certains produits et certaines filières, il est possible d'envisager un recyclage. Le domaine des batteries pourrait être le premier à le mettre en place par hydrométallurgie.

Les voies de décontamination envisagées et leur degré de maturité.

La filtration. La filtration est une étape possible de séparation des PFAS dans les eaux usées et des progrès sensibles ont été obtenus dans ce domaine²⁶. Le charbon actif offre une piste intéressante déjà utilisée à Rumilly, ville où sont fabriquées les poêles TefalTM²⁷. Ainsi, depuis la mise en place

²² Cf. l'étude menée par l'European Food Safety Authority (EFSA) : [Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food | EFSA](#)

²³ Cf. par exemple dans Le Monde : [PFAS : en France, le coût de la décontamination largement sous-estimé](#)

²⁴ Cf. : Dekant, W. et Dekant, R. Mammalian Toxicity of Trifluoroacetate and Assessment of Human Health Risks Due to Environmental Exposures. *Arch. Toxicol.*, (2023) 97(4), 1069– 1077, DOI: 10.1007/s00204-023-03454-y

²⁵ Cf. : Arp H.P.H. et al. The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA) *Environ. Sci. Technol.* (2024) 58, 45, 19925–19935 - <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06189>

²⁶ La filtration s'avère aussi efficace dans le traitement des eaux minérales. Cf. par exemple : Franke V. et al. Efficient removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: nanofiltration combined with active carbon or anion exchange *Environmental Science: Water Research & Technology*. (2019) DOI: <https://doi.org/10.1039/C9EW00286C>

²⁷ Cf. <https://www.natura-sciences.com/innovation/pfas-filtres-charbon-actifs-depollution.html>

d'une unité de traitement au charbon actif le 6 décembre 2023, l'eau potable de Rumilly a retrouvé un taux conforme aux normes en vigueur en ce qui concerne les PFAS, soit moins de 0,10 µg/L.

Notons cependant que les boues des stations d'épuration sont classiquement épandues dans les champs pour l'amendement des sols sans traitement (et donc sans filtration) préalable ce qui contribue à entretenir la pollution des milieux par les PFAS.

Le devenir des filtres usagés en suspens. La filtration ne résout cependant pas tout puisqu'il faut ensuite s'assurer du devenir des PFAS. Les filtres à charbon actif peuvent être brûlés à haute température²⁸ ou régénérés, bien que nous n'ayons pas connaissance de telles pratiques à l'heure actuelle.

Dégradation des PFAS depuis les effluents. Il n'existe à l'heure actuelle que peu de pistes pour dégrader les PFAS si l'on excepte la combustion à haute température (1400°C) qui peut s'avérer efficace (mais énergétiquement coûteuse) tout en posant de nouveaux défis, notamment par la formation de fluorure d'hydrogène (HF), un gaz toxique et corrosif qui gagnerait à être piégé sous forme de fluorure de calcium (CaF₂), solide inoffensif pour l'environnement.

Des recherches sont en cours sur, par exemple, l'utilisation d'ultra-sons qui permettent d'oxyder des PFAS au voisinage de bulles de cavitation. Cette technique de dégradation des PFAS peut néanmoins conduire à la formation de composés de plus petite taille, encore plus mobiles et difficiles à filtrer.

Les industriels et les usages face à la nécessaire évolution des normes.

La réglementation européenne REACH²⁹, entrée en vigueur en 2007, vise à sécuriser la fabrication et l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie. Pour toute nouvelle substance chimique produite, les industriels doivent prouver que celle-ci n'est pas dangereuse. Notons que cette réglementation est en évolution rapide³⁰ et que les taux acceptables en Europe pour les PFAS identifiés sont supérieurs à ce qu'ils sont aux États-Unis.

Point sur les usages et leurs alternatives.

Nous l'avons vu, les PFAS constituent des molécules aux propriétés uniques. Les préoccupations liées à la persistance, à la bioaccumulation et aux effets potentiels des PFAS à longue chaîne sur la santé humaine et l'environnement ont conduit à l'instauration de normes et d'interdictions, conduisant les fabricants à développer des alternatives, qui relèvent à l'heure actuelle du véritable défi scientifique et technologique.

Ces alternatives incluent la reformulation des substances à longue chaîne, leur remplacement par des composés perfluoroalkylés ou polyfluorés à chaîne plus courte, ou encore la substitution des procédés de fabrication par des produits chimiques non fluorés ou des méthodes alternatives. Il est donc

²⁸ La filtration doit être couplée à une destruction des PFAS par combustion à très haute température (1 400°C).

²⁹Réglementation REACH - Ministères de l'aménagement du territoire et de la transition écologique : [La réglementation REACH | Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques Ministère du Logement et de la Rénovation urbaine \(ecologie.gouv.fr\)](#)

³⁰ Pour suivre la réglementation et l'évolution législative consulter notamment :

- European Chemicals Agency (ECHA): [ECHA - European chemicals agency](#)
- [Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail](#)
- Assemblée nationale : [Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées \(PFAS\) - Dossiers législatifs - 16e → 17e législature - Assemblée nationale](#)

Pour les possibilités de substitution : cf. la page dédiée de l'Ineris : [Accueil | Substitution des composés per- et polyfluoroalkylés \(PFAS\) et des substances persistantes, mobiles et toxiques \(PMT\)](#)

indispensable d'engager un effort significatif de recherche sur le domaine en établissant des priorités claires sur les espèces qu'il sera possible de remplacer, tout en évitant de mettre en danger des domaines industriels essentiels, comme ceux de la transition énergétique (notamment batteries), nous y reviendrons.

Les usages non essentiels devraient être évités, tandis que, pour les usages incontournables, il s'agira de substituer dès que possible (*cf.* tableau 2) ou, lorsqu'il n'existe pas d'alternative, de réglementer clairement les usages et d'exiger la plus grande transparence vis-à-vis de la présence des molécules utilisées, des risques encourus par les utilisateurs et des mesures de précautions nécessaires à toutes les étapes du cycle de vie du produit, de sa fabrication à sa destruction finale. Notons que la loi adoptée en France le 20 février 2025 vise à interdire la fabrication, l'importation, l'exportation et la mise sur le marché de PFAS dont l'usage n'est pas essentiel (elle concerne seulement les cosmétiques, farts pour les sports de glisse et vêtements loisirs) et constitue, en cela, un premier pas important mais encore insuffisant.

Catégorie	Définition	Exemples d'utilisation	Recommandations
Non essentielle	Utilisations non essentielles pour la santé, la sécurité ou le fonctionnement de la société et principalement motivées par des opportunités de marché.	Produits de soin personnel et cosmétiques, farts pour skis, ustensiles de cuisine, textiles déperlants et antitaches, vêtements de loisirs.	Certaines de ces utilisations (cosmétiques, farts, vêtements de loisirs) sont concernées par la proposition de loi dont le texte a été adopté le 20 février 2025 en France ³¹ tandis que d'autres n'y sont pas mentionnées. Certains états des USA et certains pays (Danemark dans l'UE) ont déjà pris, depuis plusieurs années, des mesures visant à interdire leur présence dans les emballages alimentaires.
Substituable ³²	Utilisations ayant des fonctions importantes, mais pour lesquelles des alternatives avec des performances adéquates ont été développées.	Mousse anti-incendie de classe B.	Substituer dès que possible.
Essentielle	Utilisations considérées comme essentielles pour la santé, la sécurité et le fonctionnement de la société et pour lesquelles des alternatives ne sont pas encore établies.	Transition énergétique : Batteries lithium-ion (<i>cf.</i> infra). Membranes pour piles à combustible (type Nafion™). Fluides caloporteurs des pompes à chaleur et climatisations*. Santé et protection : Dispositifs médicaux, vêtements de protection professionnelle.	Investir dans la recherche pour mieux connaître ses molécules et dans la recherche d'alternatives. Réglementer les usages, exiger une grande transparence vis-à-vis des (i) molécules utilisées, (ii) risques encourus et (iii) mesures de précaution nécessaires.

Tableau 2 : Les fonctions des PFAS et les recommandations en fonction du type d'usage³³.

*Il existe des solutions qui, à notre connaissance, ne sont pas encore industrielles.

Des initiatives telles que le Projet *H2020 ZeroPM*³⁴ permettent de suivre l'existence et la disponibilité d'alternatives aux PFAS.

NB : Ce tableau ne mentionne pas le cas des médicaments fluorés, dont l'usage dépend de réglementations autres que REACH.

³¹ [Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées \(PFAS\) - Dossiers législatifs - 16e → 16e législature - Assemblée nationale](#)

³² *Cf.* également : Ineris – page dédiée à la substitution des PFAS : [Accueil | Substitution des composés per- et polyfluoroalkylés \(PFAS\) et des substances persistantes, mobiles et toxiques \(PMT\)](#)

³³ Modifié d'après la présentation de Frédéric Leroux faite à l'Académie des sciences le 11 février 2025.

³⁴ <https://zeropm.eu/alternative-assessment-database/>

La substitution n'est pas une solution miracle exempte de problèmes. Rappelons, par exemple, que l'interdiction du PFOA dans l'UE à partir de 2009, a conduit à son remplacement par d'autres PFAS, regroupés sous le nom commercial « GenX » (cf. tableau 1). Ces derniers sont aujourd'hui considérés comme tout aussi persistants et mobiles dans l'environnement, et ont été récemment classés comme « substance extrêmement préoccupante » par l'ECHA sur la base du règlement REACH, malgré la tentative de la société Chemours de s'y opposer, alors déboutée par la Cour de justice de l'UE³⁵.

Compte tenu de l'ampleur des recherches encore nécessaires et des moyens considérables à mobiliser pour identifier et caractériser toutes les espèces potentiellement nocives, une approche pragmatique consiste à appliquer les principes de prévention et de précaution.

Pour les usages non substituables, la fermeture des usines sur le territoire français ou européen et leur délocalisation dans des pays moins exigeants d'un point de vue réglementaire ne peut absolument pas être une solution³⁶.

La question des usages de ces molécules est fondamentale et engage profondément nos sociétés. Les batteries lithium-ion (LiB) constituent un exemple assez emblématique³⁷. Utilisées dans le monde entier comme un élément clé des infrastructures énergétiques propres et durables³⁸, elles sont présentes dans les voitures et vélos électriques. Pourtant, ces technologies émergentes intègrent des bis-perfluoroalkylsulfonimides (bis-FASI), molécules de la grande famille des PFAS. Une étude récente³⁹ montre que les concentrations environnementales à proximité des sites de fabrication, l'écotoxicité et les possibilités de traitement des bis-FASI sont comparables à celles des PFAS historiques (comme le PFOA) qui sont désormais interdits et strictement réglementés dans le monde entier. Cette étude montre que le secteur des énergies propres est une source encore méconnue et potentiellement croissante de rejets internationaux de PFAS. Ces résultats soulignent, aux moyens d'un exemple très concret, l'extrême difficulté du sujet : d'un côté le développement des batteries permettant le stockage de l'électricité fournie par les sources d'énergies renouvelables permet d'envisager de diminuer nos émissions de CO₂ conformément à la feuille de route du Gouvernement français (stratégie nationale bas carbone – SNBC⁴⁰), dans le respect des engagements de neutralité carbone fixés par l'UE, pour limiter les effets dramatiques du réchauffement climatique sur la santé et l'environnement. De l'autre, faute d'alternative aux PFAS pour fabriquer ces batteries, leur développement continuera d'alimenter le rejet de ces polluants éternels dans les milieux. Et ce qui vient d'être développé s'applique également à bon nombre de technologies émergentes (notamment les électrolyseurs et piles à combustible pour l'hydrogène (H₂)) qui dépendent des PFAS (cf. tableau 2).

Tout porte à considérer que l'on ne puisse pas, à court terme, se passer de PFAS, étant donné la spécificité de leurs propriétés physiques et chimiques. Si les PFAS doivent continuer à être utilisés, il faut que la réglementation ne consiste pas seulement à donner des valeurs acceptables de concentrations dans l'environnement mais impose un suivi du cycle de vie des PFAS depuis la synthèse des

³⁵ arrêt n°C-293/22 du 9 novembre 2023 - [CJUE, n° C-293/22, Arrêt de la Cour, Chemours Netherlands BV contre Agence européenne des produits chimiques \(ECHA\), 9 novembre 2023 | Doctrine](#). Cf. l'article : « Polluants éternels » : la firme Chemours perd une bataille devant la CJUE

³⁶ Il s'agit d'une référence à la fermeture de l'usine Solvay à Salindres.

³⁷ Notons que les PFAS sont aussi des éléments indispensables des pompes à chaleur et piles à combustible.

³⁸ Les batteries lithium-ion jouent un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie électrique issue des sources renouvelables intermittentes (éolien, solaire) et l'alimentation d'une grande variété d'appareils électriques, du téléphone portable à la voiture. Elles constituent ainsi un élément clé de l'électrification des transports.

³⁹ [Lithium-ion battery components are at the nexus of sustainable energy and environmental release of per- and polyfluoroalkyl substances | Nature Communications](#)

⁴⁰ [Stratégie nationale bas-carbone \(SNBC\) | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique](#)

molécules utilisées jusqu'à la fabrication de produits finis et à leur devenir puis élimination de l'environnement. Ce n'est qu'à ce prix, élevé, que l'on pourra continuer à exploiter leurs propriétés remarquables.

Par ailleurs, si une interdiction d'émission est appliquée, la persistance de ces molécules doit susciter une surveillance permanente et leur suivi dans tous les milieux contaminés.

Imprégnation des populations humaines et évaluation de la toxicité des PFAS.

Imprégnation des populations humaines par les PFAS, cas de la France.

Dès les années 1970, des études ont détecté la présence de certains PFAS dans le sang de travailleurs exposés. Dans les années 1990, ces substances ont aussi été retrouvées dans la population générale. Aujourd'hui, plusieurs PFAS à longue chaîne (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS) sont systématiquement mesurés dans le sérum sanguin des populations humaines des pays industrialisés⁴¹, dès la vie *in utero*⁴². Leur omniprésence, même chez des personnes non exposées professionnellement, suggère que la principale source de contamination provient de l'usage généralisé des PFAS dans les produits de consommation et par les industries.

En France, l'exposition aux PFAS a été évaluée dans le cadre du programme *Esteban*⁴³, qui a mesuré 17 PFAS, sur la période 2014-2016, dans le sérum d'enfants et d'adultes. Le PFOA et le PFOS, principaux contributeurs à l'imprégnation, ont été détectés chez 100 % des participants, parmi lesquels la moitié est contaminée au-delà du seuil de sécurité actuellement admis, formulé par la Commission allemande de biosurveillance humaine (HBM).

Lancée en 2024, l'enquête *Albane*⁴⁴ vise l'évaluation de l'état de santé de la population vivant en France (habitudes alimentaires, activité physique et exposition à diverses substances chimiques présentes dans l'environnement) et permettra notamment d'actualiser les valeurs de référence fournies par le programme *Esteban*. Copilotée par Santé publique France⁴⁵ et l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES)⁴⁶, l'enquête *Albane* prévoit de publier ses résultats à partir de 2028 (biosurveillance).

Bien que l'interdiction de certaines molécules ait entraîné une baisse des concentrations sériques des « anciens » PFAS, désormais interdits à la production ou à l'importation⁴⁷, ceux accumulés dans les océans, les chaînes alimentaires et les eaux souterraines continuent de contaminer durablement l'environnement. Par ailleurs, l'exposition totale aux nouveaux PFAS de substitution et à leurs produits de dégradation reste mal caractérisée (ex : GenX).

Grâce aux réglementations, l'exposition au PFOS et au PFOA, dont l'utilisation est désormais interdite, a diminué en France, comme plus généralement dans les pays occidentaux, au cours des dernières années, tandis que la compréhension de leurs effets sur la santé humaine progresse. Cependant, ces interdictions s'accompagnent du remplacement par des PFAS à chaîne plus courte (et

⁴¹ Les concentrations s'expriment en termes de ppb, équivalent à des nanogrammes par millilitre (ng/ml).

⁴² Cf. par exemple : *In utero exposures to perfluoroalkyl substances and the human fetal liver metabolome in Scotland: a cross-sectional study* - The Lancet Planetary Health

⁴³ [Imprégnation de la population française par les composés perfluorés : Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016 \(santepubliquefrance.fr\)](https://www.santepubliquefrance.fr/fr/actualites/2016/09/14/le-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016)

⁴⁴ [Enquête Albane](https://www.santepubliquefrance.fr/fr/actualites/2024/01/14/enquete-albane)

⁴⁵ Cf. le site de Santé publique France : [Accueil](https://www.santepubliquefrance.fr/)

⁴⁶ Cf. le site : [Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail](https://www.anses.fr/fr)

⁴⁷ Cf. par exemple une étude menée en Allemagne : Gökener B *et al.* Human biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. 2020. *Environment International*, Vol.145, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106123>.

donc plus mobiles et solubles) et d'autres substances chimiques qui ne sont pas nécessairement détectables avec les méthodes actuelles. Cette évolution pose un défi majeur aux scientifiques pour comprendre les nouvelles voies d'exposition et leurs effets sur la santé humaine dans un paysage chimique en évolution rapide.

Point sur les connaissances de la toxicité des PFAS sur la santé humaine⁴⁸.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de seuils qui permettent, sur la base des valeurs d'imprégnation, de définir un risque sanitaire pour la personne et les modalités de prise en charge. Actuellement, en Europe, pour ces molécules, une concentration de 100 ng/L dans l'eau de consommation est considérée comme dangereuse⁴⁹ ; ce seuil est établi de façon très conservatrice et ne correspond pas à une valeur établissant un seuil de toxicité. Notons cependant que plusieurs pays de l'UE estiment que ce seuil est trop élevé et plaident pour un abaissement de cette valeur de référence.

La diversité de cette famille chimique rend l'évaluation de leurs effets complexe. Les connaissances scientifiques sur les effets sanitaires des PFAS restent limitées, car – nous avons déjà eu l'occasion de le mentionner – seules quelques molécules ont été étudiées en détail. Une attention particulière est portée au PFOA et, plus généralement, aux PFAS non polymériques, dont la plus grande abondance dans les milieux, la stabilité chimique et thermique, ainsi que leur caractère hydrosoluble favorisent leur interaction avec les protéines et leur bioaccumulation dans les tissus vivants.

Les études épidémiologiques sur les PFAS à longue chaîne, notamment le PFOA et le PFOS, ont commencé à partir de 2009 et se sont multipliées ces dernières années. Elles concernent principalement trois groupes : la population générale, les personnes exposées par la consommation d'eau potable contaminée et les travailleurs manipulant ces substances.

Les preuves d'associations, voire de causalité, entre certains PFAS, comme le PFOA et le PFOS, et divers effets sanitaires ont été évaluées par des laboratoires publics et des agences gouvernementales. En dehors des cancers, les effets les mieux documentés incluent l'augmentation du taux de cholestérol dans le sang (ou hypercholestérolémie), des lésions hépatiques (augmentation du taux sanguin d'alanine aminotransférase), une diminution de la réponse vaccinale et une réduction du poids à la naissance. Un petit nombre de PFAS est ainsi impliqué dans diverses pathologies dont la figure 6 propose une synthèse : cancers (le PFOA est associé au cancer des testicules et des reins), perturbations du système thyroïdien, anomalies métaboliques (obésité, dyslipidémie), colite ulcéreuse, baisse de fertilité et atteintes hépatiques, rénales ou du développement embryonnaire. En 2023, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le PFOA comme cancérigène pour les êtres humains⁵⁰ et le PFOS comme substance cancérigène possible pour les êtres humains⁵¹.

⁴⁸ Pour en savoir plus, cf., par exemple, le site du National Toxicology Program of U.S. department of health and human services [Per- and Polyfluoroalkyl Substances \(PFAS\)](#)

⁴⁹ Cf. le site de l'ANSES : « *Le suivi des PFAS dans les eaux de boisson a été introduit par la directive européenne 2020/2184 du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH). Ainsi, à ce jour, une limite de qualité de 0,10 µg/L a été fixée pour la somme de 20 PFAS dans les EDCH. Un autre paramètre, intitulé « PFAS (total) », est également introduit avec une limite de qualité associée de 0,50 µg/L : il vise à intégrer l'ensemble des PFAS mesurables dans l'eau.* »

⁵⁰ Cf. Zahm, S. *et al.* Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. *The Lancet Oncology*, (2024) Volume 25, Issue 1, 16 – 17. [Lien.](#)

⁵¹ *Ibid.*

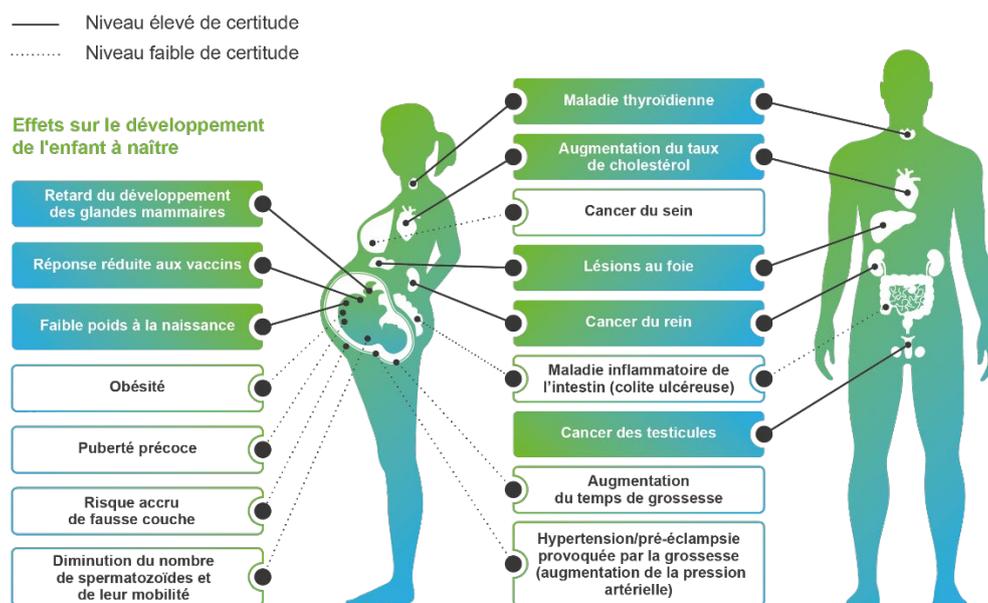


Figure 6 : Les risques suspectés et avérés de certains PFAS sur la santé humaine⁵².

Il est très important de noter que ces risques ont été évalués :

- Pour un très petit nombre de PFAS, moins d'une dizaine, parmi lesquels figurent le PFOA et le PFOS désormais interdits,
- À partir de la très faible quantité de données toxicologiques disponibles à ce jour.

Les études concernant la toxicité des PFAS restent très insuffisantes et doivent être complétées par un effort de recherche conséquent.

Notons que certaines observations réalisées en épidémiologie humaine, comme les lésions hépatiques ou la diminution de la croissance fœtale, sont en accord avec les résultats des études toxicologiques menées chez l'animal au laboratoire. En revanche, d'autres effets restent encore incertains, faute de données suffisantes ou en raison de résultats contradictoires, comme les effets neurologiques du PFOS qui ne sont pas établis.

Que reste-t-il à savoir de la toxicité des PFAS sur la santé humaine ?

Il faut rappeler que les données présentées ci-avant, dont certaines commencent à être bien étayées, ne s'appliquent néanmoins qu'à un nombre très restreint de PFAS. La quantité pléthorique de ces molécules aux caractéristiques et comportement variés place la communauté scientifique face au défi immense d'évaluer la toxicité de chaque molécule de cette famille. Pourtant c'est essentiel. Les enseignements tirés des PFAS « historiques » montrent qu'un manque de données ne devrait pas justifier un report des mesures de réduction des risques.

Alors que certaines substances préoccupantes sont progressivement éliminées ou interdites, d'autres PFAS émergent en tant que substances alternatives, et sont produites et rejetées dans l'environnement. Ces nouveaux PFAS, qui pour certains ne sont pas encore détectables par les méthodes développées, pourraient aussi entraîner des conséquences sanitaires. Des études larges et approfondies sont très attendues, et font l'objet de plusieurs programmes détaillés.

⁵² Traduit et modifié d'après *European Environment Agency* (EEA).

Une des limites des études toxicologiques réside dans le fait que les résultats obtenus sur des animaux de laboratoire (principalement des rongeurs) ne sont pas nécessairement transposables en l'état à des populations humaines et de nombreuses précautions s'imposent.

Par ailleurs, dans des études épidémiologiques, il est délicat d'imputer l'apparition d'une pathologie chez l'être humain à une seule molécule, dès lors que :

- les populations humaines sont en permanence exposées à un vaste cocktail de molécules potentiellement toxiques (notamment microparticules de plastique, métaux lourds, pesticides) ;
- les syndromes développés sont les mêmes dans beaucoup de cas de contaminations.

Il apparaît alors difficile de faire passer la toxicité d'une molécule d'« effet probable » à « effet avéré ».

Certaines populations présentent néanmoins des degrés d'exposition particulièrement forts aux PFAS et leur suivi peut permettre d'identifier des effets. En particulier, les pompiers constituent des groupes à surveiller de près car ils sont particulièrement exposés par le biais des mousses anti-incendie et de leurs tenues ignifugées et imperméabilisées. Des études récentes ont permis de mettre en évidence leurs forts taux de contamination, et de suggérer qu'une exposition accrue aux PFAS pourrait constituer un risque augmenté pour la santé de ces professionnels⁵³.

Notons que les informations sont encore limitées car elles restent centrées sur quelques composés parmi les milliers existants, et ne permettent pas de déterminer la prévalence de pathologies liée à l'exposition aux PFAS, ni même les effets engendrés par l'exposition cumulée à plusieurs PFAS ou à plusieurs substances chimiques préoccupantes, dont les PFAS.

La complexité des interactions et processus de dégradations de ces substances lorsqu'elles passent d'un compartiment à un autre des écosystèmes (sols, nappes phréatiques, eaux de surface, organismes) nécessite une connaissance fine et précise des mécanismes impliqués, et requiert une collaboration entre spécialistes de différents domaines scientifiques et notamment de chimistes de l'environnement, spécialistes des transformations de micropolluants et toxicologues.

⁵³ Cf. la revue : Mazumder N.U.S *et al.* Firefighters' exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as an occupational hazard: A review. *Front. Mater* (2023). 10:1143411. doi: 10.3389/fmats.2023.1143411.

Conclusion et recommandations

La pollution aux PFAS est d'une complexité inédite et pose des défis majeurs à nos sociétés. Contrairement aux pollutions historiques aux hydrocarbures ou aux métaux lourds (comme le mercure), dont l'origine est bien identifiée et la remédiation scientifiquement envisageable, la pollution aux PFAS se révèle beaucoup plus diffuse et persistante. Si certaines molécules, comme le PFOA, le PFOS ou les GenX, sont liées à des sites industriels connus, des centaines, voire des milliers, d'autres PFAS sont disséminés dans l'environnement, rendant leur traçabilité et leur élimination extrêmement complexes.

S'il est possible, comme le prévoit la loi récemment votée en France, d'envisager de limiter, voire mieux d'interdire, les usages non essentiels, de PFAS, il est indispensable de comprendre que certaines de ces substances sont devenues essentielles à de nombreux secteurs industriels, et notamment celui de la transition énergétique, où elles restent aujourd'hui difficilement substituables, pour ne pas dire, irremplaçables. Faire face à cet enjeu implique des efforts exceptionnels de recherche afin de mieux comprendre ces molécules, développer des solutions de substitution et mettre au point des méthodes de remédiation efficaces. En attendant ces avancées, un suivi rigoureux de la présence et du devenir des PFAS est impératif, étant donné l'enjeu de santé publique et environnementale que cela représente.

Enfin, si les PFAS concentrent aujourd'hui l'attention médiatique et politique, ils ne sont qu'un élément de l'ensemble des expositions chimiques subies par les populations et les écosystèmes. L'étude de cet exposome chimique⁵⁴, et en particulier des effets synergiques entre ses différents composants, doit être très fortement encouragée et financée. L'Académie des sciences s'engage ainsi à poursuivre cette réflexion en mobilisant un groupe d'experts chargé de produire un rapport spécifique à destination du grand public et des décideurs.

Ce rapport conduit à la formulation de 5 recommandations principales concernant les PFAS.

Recommandation 1 : Transparence – La traçabilité des PFAS doit devenir la règle.

Les PFAS sont omniprésents dans notre quotidien, mais leur présence est rarement indiquée sur les produits que nous utilisons, faute de réglementation. Une traçabilité stricte est nécessaire, depuis leur synthèse industrielle jusqu'aux produits finis et leur fin de vie.

L'étiquetage des produits doit mentionner précisément les PFAS qu'ils contiennent, à l'image de l'obligation de déclaration des ions dans les eaux minérales. Cette transparence est essentielle :

- Pour permettre aux consommateurs de faire des choix éclairés dès lors que certains usages ne sont pas essentiels ou qu'une alternative est disponible ;
- Pour assurer un meilleur suivi environnemental, en traçant le devenir de ces substances à chaque étape de leur cycle de vie.

Recommandation 2 : Contrôle – Tout rejet de PFAS dans l'environnement, en particulier en aval des sites de production industrielle, doit être strictement interdit.

⁵⁴Pour en savoir plus : voir David A. *et al.* Exposome chimique et approches « non ciblées » Un changement de paradigme pour évaluer l'exposition des populations aux contaminants chimiques. *Médecine Sciences*, Volume 37, Numéro 10, Octobre 2021. <https://doi.org/10.1051/medsci/2021088>

Et visionner : Collège de France – Rémy Slama : [L'exposome : promesses et défis d'un nouveau concept | Collège de France](#)

L'absence d'émissions de PFAS dans l'environnement depuis les sites industriels de production doit désormais être garantie. Ces sites étant peu nombreux, un contrôle pourrait être mis en place efficacement et rapidement.

Recommandation 3 : Connaissance – Les efforts de recherche sur la détection, la caractérisation et l'évaluation des effets des PFAS sur la santé et l'environnement doivent être intensifiés.

Les connaissances scientifiques disponibles sur les PFAS sont encore extrêmement limitées.

La détection des PFAS repose sur des techniques analytiques de pointe, dont les limites doivent être sans cesse repoussées. Une approche interdisciplinaire est indispensable pour améliorer ces méthodes et identifier les molécules encore inconnues.

Deux stratégies complémentaires sont nécessaires :

- Mesurer le fluor total pour une détection rapide et efficace de la pollution ;
- Identifier précisément les molécules présentes grâce aux techniques avancées de chromatographie et de spectrométrie.

Seul un couplage d'une large diversité de techniques, dont les limites doivent toujours être repoussées, permettront de répondre à l'enjeu sociétal de la détection de polluants de plus en plus variés, en quantités de plus en plus infimes.

Au-delà de leur détection, il est essentiel d'acquérir une compréhension globale des propriétés de ces molécules et de leurs produits de dégradation – notamment le TFA –, de leur comportement dans des milieux variés (sols, eaux, atmosphère) et de leurs effets sur la santé. Cet objectif requiert un effort accru dans plusieurs champs disciplinaires de la recherche en santé et en environnement, parmi lesquels la chimie analytique, la toxicologie, l'épidémiologie, la modélisation et les sciences de l'environnement.

Une telle connaissance constitue un levier primordial pour établir les priorités en matière de substitution et de développement de méthodes de remédiation.

Recommandation 4 : Substitution – Un grand plan de recherche public et privé doit être lancé pour remplacer les PFAS.

Un plan de substitution ambitieux doit être élaboré à l'échelle internationale, en associant la recherche publique et les industriels.

La loi tout récemment votée en France cible trois secteurs d'activité. Cependant, elle néglige les industries liées à la transition énergétique, où les PFAS sont aujourd'hui indispensables (batteries, piles à combustible, fluides caloporteurs des pompes à chaleur). Aucune alternative viable n'existe à ce jour dans ces domaines. Ces utilisations et développements ne devant pas être arrêtés, ils doivent être accompagnés d'une traçabilité stricte et d'efforts de recherche pour développer des substituts.

Recommandation 5 : Remédiation – Des méthodes efficaces pour éliminer les PFAS des milieux contaminés doivent être développées.

Un grand programme de recherche doit être lancé pour améliorer les méthodes d'élimination des PFAS.

Certaines techniques actuelles, comme le charbon actif, permettent déjà d'éliminer plus de 90 % du fluor total présent dans l'eau. D'autres procédés, comme l'incinération, sont efficaces mais posent

de nouveaux défis, notamment par la formation de fluorure d'hydrogène (HF), gaz toxique et corrosif. Il est envisageable de piéger ce sous-produit sous forme de fluorure de calcium (CaF_2), inoffensif pour l'environnement et cette initiative ne pourra aboutir qu'à travers une coopération étroite entre laboratoires académiques, entreprises spécialisées en remédiation environnementale et industriels.

Annexes

Auditions : les experts entendus par le GT

07 mai 2024 : Rémy SLAMA, DR Inserm, Directeur de l'Institut thématique de santé publique et l'équipe d'épidémiologie environnementale de l'Institut pour l'avancée des biosciences.

14 juin 2024 : Pierre LABADIE, DR CNRS, UMR Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux.

19 juin 2024 : Hélène BUDZINSKY, DR CNRS en Chimie de l'environnement, écotoxicologie, et chimie analytique.

07 janvier 2025 : Sergey NIKITENKO, DR CNRS, et Tony CHAVE, CR CNRS, ICSM (Institut de chimie séparative de Marcoule) au laboratoire de Sonochimie dans les Fluides Complexes.

15 janvier 2025 : Robert BAROUKI, PU-PH, chef du service de biochimie métabolique à l'hôpital Necker-enfants malades, professeur à l'Université Paris Cité, directeur de l'UMR « Toxicité Environnementale, Cibles Thérapeutiques, Signalisation Cellulaire et Biomarqueurs (T3S) », Inserm.

11 février 2025 : Frédéric LEROUX, DR CNRS, directeur du Laboratoire d'innovation moléculaires et applications (LIMA, CNRS/Unistra/UHA), dans le cadre d'une Rencontre Club CNRS Entreprises organisée à l'Académie des sciences sur le thème des PFAS.

Bibliographie complète

1. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail](#)
2. Arp H.P.H. *et al.* The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA) *Environ. Sci. Technol.* (2024) 58, 45, 19925–19935 - <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06189>
3. Assemblée nationale : [Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées \(PFAS\) - Dossiers législatifs - 16e → 17e législature - Assemblée nationale](#)
4. ChemSec -PFAS Guide, [PFAS Guide - Find PFAS chemicals in your products](#)
5. Collège de France – Rémy Slama : [L'exposome : promesses et défis d'un nouveau concept | Collège de France](#)
6. Cour de Justice de l'Union Européenne - arrêt n°C-293/22 du 9 novembre 2023 - [CJUE, n° C-293/22, Arrêt de la Cour, Chemours Netherlands BV contre Agence européenne des produits chimiques \(ECHA\), 9 novembre 2023 | Doctrine](#)
7. David A. *et al.* Exposome chimique et approches « non ciblées » Un changement de paradigme pour évaluer l'exposition des populations aux contaminants chimiques. *Médecine Sciences*, Volume 37, Numéro 10, Octobre 2021. <https://doi.org/10.1051/medsci/2021088>
8. Dekant, W. et Dekant, R. Mammalian Toxicity of Trifluoroacetate and Assessment of Human Health Risks Due to Environmental Exposures. *Arch. Toxicol.*, (2023) 97(4), 1069– 1077, DOI: 10.1007/s00204-023-03454-y
9. Endo S. *et al.* Experimental Determination of Air/Water Partition Coefficients for 21 Per- and Polyfluoroalkyl Substances Reveals Variable Performance of Property Prediction Models. *Environ. Sci. Technol.* (2023), 57, 22, 8406–8413 <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02545>
10. Enquête Albane - **Santé publique France et l'Anses - Enquête Albane**
11. European Chemicals Agency (ECHA): [ECHA - European chemicals agency](#)
12. European Environment Agency (EEA): [PFAS pollution in European waters | European Environment Agency's home page](#). Rapport de décembre 2024
13. European Food Safety Authority (EFSA): [Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food | EFSA](#)

14. Franke V. *et al.* Efficient removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: nanofiltration combined with active carbon or anion exchange *Environmental Science: Water Research & Technology*. (2019) DOI: <https://doi.org/10.1039/C9EW00286C>
15. Glüge J. *et al.* An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) *Environ. Sci.: Processes Impacts* (2020), 22, 2345. DOI: [10.1039/d0em00291g](https://doi.org/10.1039/d0em00291g)
16. Göckener B *et al.* Human biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. 2020. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106123>.
17. Guelfo, J.L. *et al.* Lithium-ion battery components are at the nexus of sustainable energy and environmental release of per- and polyfluoroalkyl substances. *Nat Commun* (2024)15, 5548. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49753-5>
18. Hyötyläinen T. *et al.* In utero exposures to perfluoroalkyl substances and the human fetal liver metabolome in Scotland: a cross-sectional study. *The Lancet Planetary Health*, (2024) Volume 8, Issue 1. [Lien.](#)
19. Ineris - rapport sur les PFAS : RAP-213870-2789035 PFAS bibliographie SIT 21-v1.pdf
20. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC)- [PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances](#). Site consulté la dernière fois le 20 Février 2025
21. Ineris – page dédiée à la substitution des PFAS : [Accueil | Substitution des composés per- et polyfluoroalkylés \(PFAS\) et des substances persistantes, mobiles et toxiques \(PMT\)](#)
22. La gazette du laboratoire - <https://www.gazettelabo.fr/galerie/4180ANALYTIK-JENA-dosage-fluor.html>
23. Le Monde – article du 14 janvier 2025 : [PFAS : en France, le coût de la décontamination largement sous-estimé](#)
24. Le Monde – article du 9 novembre 2023 : [« Polluants éternels » : la firme Chemours perd une bataille devant la CJUE](#)
25. Mazumder N.U.S *et al.* Firefighters’ exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as an occupational hazard: A review. *Front. Mater*(2023). 10:1143411. doi: 10.3389/fmats.2023.1143411
26. National Toxicology Program of U.S. department of health and human services [Per- and Polyfluoroalkyl Substances \(PFAS\)](#)
27. Natura science - <https://www.natura-sciences.com/innovation/pfas-filtres-charbon-actifs-depollution.html>
28. Réglementation REACH - Ministères de l’aménagement du territoire et de la transition écologique : [La réglementation REACH | Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation Ministère de la Transition écologique, de l’Énergie, du Climat et de la Prévention des risques Ministère du Logement et de la Rénovation urbaine \(ecologie.gouv.fr\)](#)
29. Santé publique France - [Accueil](#)
30. Santé publique France – Programme Esteban : [Imprégnation de la population française par les composés perfluorés : Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016 \(santepubliquefrance.fr\)](#)
31. [Stratégie nationale bas-carbone \(SNBC\) | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique](#)
32. Sunderland E.M. *et al.* A Review of the Pathways of Human Exposure to Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) and Present Understanding of Health Effects. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2018; 29(2):131–147. doi: [10.1038/s41370-018-0094-1](https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1)
33. Teymoorian T *et al.* Target and Suspect Screening Reveal PFAS Exceeding European Union Guideline in Various Water Sources South of Lyon, France. *Environmental Science & Technology Letters*. (2025). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c01126>
34. Zahm, S. *et al.* Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. *The Lancet Oncology*, (2024) Volume 25, Issue 1, 16 – 17. [Lien.](#)
35. ZeroPM Alternative Assessment Database - <https://zeropm.eu/alternative-assessment-database/>

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Les grandes phases de l’émergence des PFAS et de la sensibilisation associée.

Figure 2 : Quelques exemples de sources de PFAS issues de nos vies quotidiennes ou d’usage industriel et professionnel.

Figure 3 : Les sources d’émissions et d’exposition aux PFAS.

Figure 4 : Structure moléculaire de quelques PFAS.

Figure 5 : Vue d'ensemble des voies d'exposition aux PFAS pour différentes populations humaines en dehors des milieux professionnels.

Figure 6 : Les risques suspectés et avérés de certains PFAS sur la santé humaine.

Tableau 1 : Quelques PFAS et exemples de leurs utilisations.

Tableau 2 : Les fonctions des PFAS et les recommandations en fonction du type d'usage.

Liste des acronymes et symboles

Abréviation et acronymes

Anses – Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ECHA – European Chemicals Agency

EQS – Environmental quality standards

FTOHs – Alcools fluorotélomères

OCDE – Organisation de coopération et de développement économiques

PFAS – *Per- and polyfluoroalkyl substances* traduit en français par substances per- et polyfluoroalkylées

PFBA – Acide heptafluorobutyrique

PFHxA – Acide perfluorohexanoïque

PFHxS – Sulfonate de perfluorohexane

PFNA – Acide perfluorononanoïque

PFOA – Acide perfluorooctanoïque

PFOS – Sulfonate de perfluorooctane

REACH (directive européenne) – *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*, traduit en français par enregistrement, évaluation et autorisation des substances chimiques.

TFA – Acide trifluoroacétique

UE – Union européenne

UV – Ultraviolets

Symboles et formules chimiques

C – Symbole du carbone (élément chimique)

F – Symbole du fluor (élément chimique), dont les isotopes ^{18}F et ^{19}F sont respectivement radioactif et stable.

CF_2 – Formule chimique du groupe méthylène perfluoré d'un PFAS

CF_3 – Formule chimique du groupe méthyle perfluoré d'un PFAS

HF – Formule chimique de la molécule de fluorure d'hydrogène

CaF_2 – Formule chimique de la molécule de fluorure de calcium

g – Symbole du gramme (unité de masse) ; $1\text{ng} = 10^{-9}\text{g}$; $1\text{pg} = 10^{-12}\text{g}$

m^3 – Symbole du mètre cube (unité de volume)

L – Symbole du litre (unité de volume)

Les symboles pg/m^3 et ng/L correspondent à des unités de mesure de concentrations de PFAS respectivement dans l'air et dans l'eau.