

Note bibliographique : Les Substances Per- et PolyFluoroalkylées (PFAS) en air ambiant.

Date : Avril 2024

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) sont des contaminants anthropiques fortement persistants dans l'environnement et toxiques pour les humains et la faune. Les PFAS émises dans l'atmosphère peuvent s'adsorber sur les particules fines et être transportées sur de longues distances pour se déposer dans des environnements éloignés de toute source. Les premières campagnes de mesure en air ambiant, principalement en Europe occidentale, Amérique du Nord et dans l'Est Asiatique remontent au début des années 2000.

Les PFAS

Sources et applications

Les Substances Per- et PolyFluoroAlkylées ou PFAS (pour « Per-PolyFluoroAlkyl Substances » en anglais, souvent prononcé « pifasse ») sont des composés pour lesquels des atomes de Fluor remplacent tout ou partie des atomes d'Hydrogène (figure 1). Elles sont classifiées selon leur groupe fonctionnel en 33 catégories, et il existe plusieurs milliers de composés distincts (jusqu'à 9000-12000 (Mohammed Taha et al. 2022; Williams et al. 2022)). Les PFAS sont des composés contenant une chaîne d'atomes hydrophobes de carbone et de Fluor ($C_nF_{2n+1}-R$) qui peuvent être stables sous leur forme neutre ou ionisée. Les plus connus sont les acides perfluoroalkane-sulfonique (PFSA), les acides perfluoroalkyliques-carboxyliques (PFCA), les alcools fluorotélomères (FTOH), ou encore les acides sulfoniques fluorotélomères (FTSA) (Voir annexe 1).

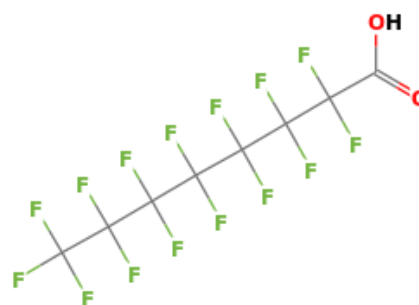


Figure 1: Exemple de formule chimique d'une PFAS (PFOA: $C_8HF_{15}O_2$) - Source NIST.GOV

En raison de leur forte solubilité dans l'eau et leur faible volatilité, la plupart des PFAS sont mesurées dans les eaux souterraines et de surface. Du fait de leur caractère hydrophile et hydrophobe, les PFAS ont cependant tendance à s'accumuler à l'interface eau/air (Schaefer et al. 2019) et donc à se volatiliser dans l'atmosphère (Brusseau et Guo 2022). Certains PFAS comme les fluorotélomères sont très volatils. On appelle « précurseurs » les PFAS polyfluorées qui vont se biodégrader en PFAS perfluorées stables. Les PFAS portent donc le nom de « polluants éternels » car la liaison atomique Carbone-Fluor très forte résiste à toute dégradation totale dans l'environnement.

Ces composés chimiques synthétisés depuis les années 1940 ont de larges applications commerciales et industrielles telles que revêtement de poêle antiadhésive, emballage alimentaire, textiles d'habillement, galvanoplastie de métaux pour les cartes électroniques, et mousses anti-incendie. Les PFAS sont émises dans l'atmosphère par des installations industrielles, des installations de stockage de déchets (Stoiber, Evans, et Naidenko 2020), des stations d'épuration (Lin et al. 2022), la lutte contre les incendies d'hydrocarbure (Bräunig et al. 2019; Baduel et al. 2017), des sites d'incinération, mais aussi par des produits de consommation de l'intérieur des logements (revêtements de sols, meubles...) (Faust 2023; Morales-McDevitt et al. 2021). Quelques groupes de recherche ont récemment recensé les sources de PFAS (BdD Activipoll (Bureau de Recherches Géologiques et Minières: service gratuit) - PFAS Screening Tools (Antea-Group: service payant)) ainsi que les sites contaminés par des PFAS, notamment le « Forever Pollution Project » en collaboration avec Le Monde.

Transports atmosphériques

Une fois présentes dans l'atmosphère les PFAS sont transportées en phase gaz et en phase particulaire sur de longues distances et peuvent se déposer dans des régions vierges de toute source locale. En particulier, les composés volatils fluorotélomères, tels que les alcools fluorotélomères (FTOHs) sont facilement transportés dans l'atmosphère et, une fois oxydés deviennent une source secondaire de dépôt atmosphériques de PFAS (Yarwood et al. 2007; P. Thackray, E. Selin, et J. Young 2020). En effet, les PFAS à faible pression de vapeur saturante sont les plus susceptibles de s'adsorber sur les particules d'aérosol. Les PFAS solubles dans l'eau et à courte chaîne ont plutôt tendance à migrer au cœur des particules d'aérosol aqueux alors que les PFAS à longue chaîne s'adsorberont plutôt à leur surface. Les propriétés tensio-actives des PFAS peuvent alors impacter la physique des noyaux de condensation de nuage allant jusqu'à augmenter la nucléation en glace des particules d'aérosol (Wolf et al. 2021; Garnett et al. 2021).

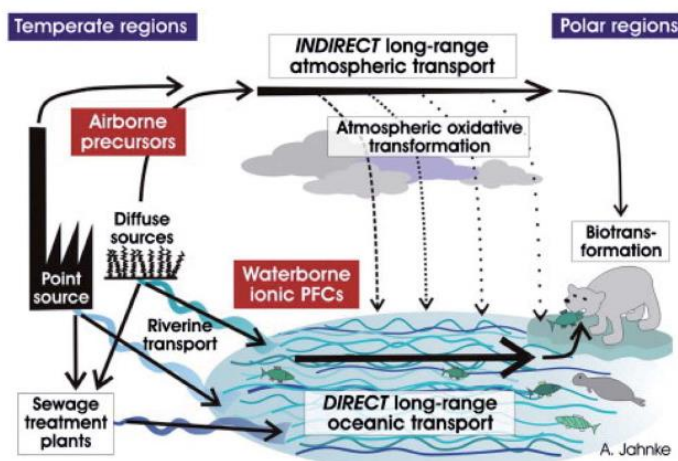


Figure 2: Faust 2023

Mesures de PFAS en air ambiant

Peu d'informations existent sur les **pollutions de l'air ambiant par les PFAS** et leurs rejets dans l'atmosphère, du fait de **l'absence de méthodes standardisées d'analyses de l'air**. Des données sont cependant disponibles sur les retombées de PFAS autour de quelques sites de rejets et la modélisation de ces retombées (Etats-Unis) (D'Ambro et al. 2021). Récemment, l'IGEDD a publié un rapport sur les « risques de présence de PFAS dans l'environnement » et montre que les PFAS sont présents dans toutes les matrices environnementales.

Une étude de l'université de Stockholm et de l'Ecole polytechnique de Zurich (Cousins et al. 2022) a montré que les eaux de pluies qui lessivent les particules de l'atmosphère, étaient par ailleurs contaminées par les PFAS à des niveaux supérieurs aux lignes directrices de l'US Environmental Protection Agency (US-EPA) pour l'eau potable à peu près partout dans le monde. L'US-EPA a prévu d'importants efforts de recherche et développement dans le domaine de l'air ambiant dans le cadre de sa feuille de route (Fox 2022). A défaut de méthode d'analyse standardisée, des équipes de laboratoires scientifiques publient régulièrement les résultats de leurs travaux exploratoires en termes de prélèvements et d'analyses de PFAS dans l'atmosphère (Joerss et Menger 2023).

Méthode de prélèvement

L'échantillonnage de PFAS en air ambiant peut se faire en prélèvement actif (aspiration par pompe sur filtre et mousse) ou passif (exposition à l'air ambiant de support d'adsorption). Les supports de sorption couramment utilisés sont les filtres en fibre de verre ou de quartz pour la phase particulaire et les mousses en polyuréthane (PUF), les résines échangeuses d'ion (XAD), les disques en polyuréthane imprégnés de d'absorbant (SIP) et les cartouches d'extraction en phase solide (SPE) pour la phase gaz (composés gazeux ou semi-volatils) (Nakayama et al. 2019). Pour éviter des résultats d'analyse faussement positif, un soin particulier doit être apporté lors de la collecte de PFAS en évitant l'utilisation des matériaux contenant du Fluor, comme le Teflon aussi bien sur les lignes que sur les supports de prélèvement.

Il existe plusieurs revues bibliographiques récentes des méthodes de prélèvement passifs de PFAS en air ambiant (Lai et al. 2019; Manz et al. 2023; Nakayama et al. 2019). Les techniques de prélèvement passif visent à collecter sur une longue période sans besoin en énergie, mais il n'existe cependant pas de méthode standardisée. Il est cependant important de noter que les taux d'échantillonnage sont très variables selon le

type de préleveur passif utilisé et la famille de PFAS considérée. Du fait du taux d'échantillonnage variable, le temps pour atteindre un état d'équilibre sur le support peut varier de quelques heures à plus de 60 jours sur des PUF ou des feuilles de polyéthylène (Kim et al. 2012; Dixon-Anderson et Lohmann 2018) ce qui conditionne la durée d'échantillonnage possible. Le prélèvement passif reste couramment utilisé pour mesurer des tendances spatiales et temporelles de concentration en PFAS en air intérieur ou extérieur, mais il est difficile d'évaluer précisément le volume de prélèvement ce qui rend les résultats indicatifs (Morales-McDevitt et al. 2021; Queron et Dutouquet 2022; Karásková et al. 2018).

Les techniques de prélèvement actif permettent quant à elles de collecter séparément la phase particulaire et la phase gaz, mais elles impliquent une mise en place plus onéreuse que les techniques passives. L'échantillonnage par préleveurs actifs à haut-débit (HV-AAS) ou bas-débit (LV-AAS) permet de calculer les concentrations en phase particulaire et en phase gaz des PFAS représentatives de l'air ambiant et ainsi d'obtenir des informations sur leur répartition gaz/particule dans l'atmosphère. Des artefacts de prélèvements sont également rapportés, notamment la sous-représentation (-30 à -95%) de certains PFAS en phase gazeuse collectés sur des filtres quartz (Melymuk et al. 2014), ainsi que la volatilisation des PFAS les plus volatils prélevés sur PUF, alors que les filtres en fibre de verre piègent les PFAS de manière irréversible. De ce fait il est recommandé d'une part d'avoir recours à des préleveurs réfrigérés pour éviter l'évaporation des composés les plus volatils, notamment lorsque la température ambiante est élevée ; et d'autre part d'effectuer des blancs dynamiques, des intercomparaisons avec différents supports et des campagnes à différentes saisons pour garantir le contrôle qualité des campagnes de mesure à défaut d'une méthode standardisée.

Actifs ou passifs, les préleveurs ne permettent cependant d'échantillonner actuellement qu'une partie de la famille des PFAS en fonction de leur volatilité (par exemple des fractions limitées de famille de précurseurs volatils de PFAS).

Pour conduire l'analyse des échantillons prélevés de manière active ou passive, les différents filtres, mousses ou cartouches de prélèvement doivent subir une méthode d'extraction qui permet de récolter dans un solvant les composés présents sur le support d'échantillonnage. Les PFAS ionisables et ioniques sont souvent extraits par des techniques distinctes et complémentaires.

Malgré l'intérêt important apporté aux PFAS, certains champs d'étude n'ont pas encore été explorés notamment concernant les PFAA et les précurseurs de PFAS à chaîne courte et à volatilité élevée (le 4 :2 FTOH par exemple) car très peu de préleveurs conventionnels parviennent à les piéger. A cet effet, Wu et al. 2021, ont développé un nouveau préleveur d'air qui permet l'échantillonnage simultané des PFAS en phase gaz et en phase particulaire (Wu et al. 2021), mais les supports et le préleveur utilisés sont très onéreux.

Une revue de la littérature scientifique publiée en 2023 par J. Faust, recense les travaux effectués ces vingt dernières années sur les PFAS présentes dans l'aérosol atmosphérique (Faust 2023). Cet article met en lumière les défis à relever pour améliorer la quantification de PFAS dans les particules fines et mieux comprendre leur répartition gaz/particule ainsi que leur distribution en taille. En effet, que ce soit par prélèvement actif ou passif, ces deux méthodes présentent des biais d'échantillonnage. La volatilité des PFAS étant dépendantes des conditions de température, d'humidité et de pH, celles-ci seront plus susceptibles de s'adsorber sur la matière particulaire à basse température qu'à haute température ambiante (Hammer et Endo 2022). De plus, la compréhension de la répartition gaz/particule des PFAS permettraient de mieux modéliser leur transport atmosphérique (Radi, Noll, et Oskouie 2022).

Techniques analytiques

Ciblée ou non-ciblée, il existe deux grands types méthodes de quantification des PFAS.

Face à la difficulté de quantifier séparément chacun des composés PFAS, une méthode de quantification globale et « non-ciblée » est en train de voir le jour (James et al. 2023). Cette méthode nommée « TOP Assay » [Total Oxidisable Precursors] qui quantifie la somme totale des PFAS présents dans un échantillon, présente également un intérêt fort pour les pouvoirs législatifs qui peinent à réguler, contrôler voire interdire la production et l'utilisation de PFAS dans l'industrie. A ce jour, seuls une dizaine de laboratoire dans le monde

maitrise cette méthode, et aucun d'entre eux ne pratique encore d'analyse sur des échantillons atmosphériques (Charbonnet et al. 2022).

La méthode « ciblée », est la plus usitée, elle consiste à identifier puis à quantifier chacune des substances PFAS recherchées, par des méthodes d'analyse par spectrométrie de masse à (très) haute-résolution couplée à une séparation par chromatographie liquide ou gazeuse (LC-HRMS, HPLC-MS/MS, GC-MS/MS, et d'autres). Bien qu'efficace, cette méthode est fastidieuse et nécessite la connaissance à priori des substances à identifier, ainsi que l'achat onéreux de substances d'étalonnage. Cette méthode « ciblée » permet actuellement de quantifier jusqu'à plusieurs dizaines de composés PFAS présents dans des échantillons d'aérosol (Wu et al. 2021; Lin et al. 2020; Kim et al. 2012; Fang et al. 2018). Si les meilleurs laboratoires ont pu quantifier jusqu'à 500 composés PFAS, **seuls une quarantaine de composés sont actuellement analysés en « routine »** dans le monde.

La présence de PFAS dans de nombreuses matrices environnementales (sols, eaux, faune, végétaux, animaux) a déjà été largement documenté, cependant le nombre de publications scientifiques sur les mesures PFAS dans l'air ne s'est accru que lors des dernières années (Joerss et Menger 2023; Manz et al. 2023).

Les exemples qui suivent donnent un aperçu des différentes techniques et résultats de mesure de substances per-poly fluoroalkylées en air ambiant. Ces études présentent des typologies de sites différentes. L'équipe de Fang et al. (2018) a mesuré 26 PFAS « historiques » et de substitution dans des échantillons d'air ambiant collectés par prélèvement actif au-dessus de surfaces maritimes en Chine. La somme des concentrations de PFAS se situe entre 70 et 430 pg m^{-3} , et l'équipe de recherche a investigué les flux de dépôt sec ainsi que la distribution/répartition gaz/particule, phénomènes physico-chimiques déterminant dans les transferts eau/air des polluants (Fang et al. 2018). D'autres études montrent également un transfert eau/air important des PFAS au-dessus des mers (Sha et al. 2022; Zhao et al. 2020).

Wu et al. (2021) ont analysé des échantillons en air ambiant à Tsukuba (Japon) obtenus en juillet 2020 par prélèvement actif avec un NS20 (nanosampler-20 [QFF-PUF-GAIAC]) qui permet de collecter des PFAS ioniques et neutres présents en phase gazeuse et en phase particulaire. Les PFAS ionisables sont analysés par LC-MS/MS, alors que les PFAS neutres sont quantifiés par GC-MS/MS. Sur les 48 PFAS ciblés, 19 ont été détectés et quantifiés. La concentration totale maximale mesurée est de $\sum\text{PFAS} = 690 \text{ pg m}^{-3}$. Les concentrations en 4 :2, 6 :2, 8 :2 et 10 :2 FTOH sont de 4,0 ; 190 ; 160 et 36 pg m^{-3} respectivement. 8 :2 FTOH est régulièrement cité dans la littérature comme le PFAS neutre parmi les plus quantifiés dans l'air ambiant en Amérique du Nord, Brésil, Europe et Asie (jusqu'à 240 pg m^{-3}) (Wu et al. 2021; Kourtchev et al. 2023) (Morales-McDevitt et al. 2022) (Lin et al. 2020).

L'équipe Zhou et al. a mesuré les concentrations en PFAS en air ambiant sur la fraction des PM_{2.5} sur 5 sites en Caroline du Nord (USA) pendant une période d'un an en 2019. 34 composés PFAS ont été quantifiés par UHPLC/ESI-MS/MS. Les concentrations moyennes mesurées se situent en 0.004 et 14,1 pg m^{-3} . Les concentrations en acide perfluorooctanoïque (PFOA) et acide sulfonique perfluorooctane (PFOS) sont comprises entre 0.18 et 14.1 pg.m^{-3} , ces résultats sont comparables aux mesures précédemment effectuées au Canada et en Europe (0.02 – 3.5 pg m^{-3}) (Jiaqi Zhou et al. 2022; J. Zhou et al. 2021).

Des mesures en Europe ont aussi été menées.

Une équipe européenne a investigué 4 sites entre 2005 et 2006, (2 sites au Royaume-Uni, un en Irlande et un en Norvège) et a mesuré des concentrations en PFOA, 8 :2 FTOH et 6 :2 FTOH de 1-818 pg. m^{-3} , 5-243 pg. m^{-3} et 5-189 pg.m^{-3} , respectivement (Barber et al. 2007; Jahnke et al. 2009; Harrad et al. 2019). De même, une équipe tchèque a mesuré, entre 2012 et 2014, des concentrations en phase gaz et particulaire de 20 PFAS allant de 0.03 à 2.08 pg. m^{-3} , avec une concentration moyenne de 0.52 pg. m^{-3} sur les 74 échantillons prélevés (Paragot et al. 2020). En 2012, en Allemagne, des concentrations totales de 12 PFAS ont été mesurées, sur des échantillons en phase gaz et particulaire, entre 8.6 et 155 pg m^{-3} avec une forte prédominance (61.9%) de 8 :2 FTOH (Lin et al. 2020).

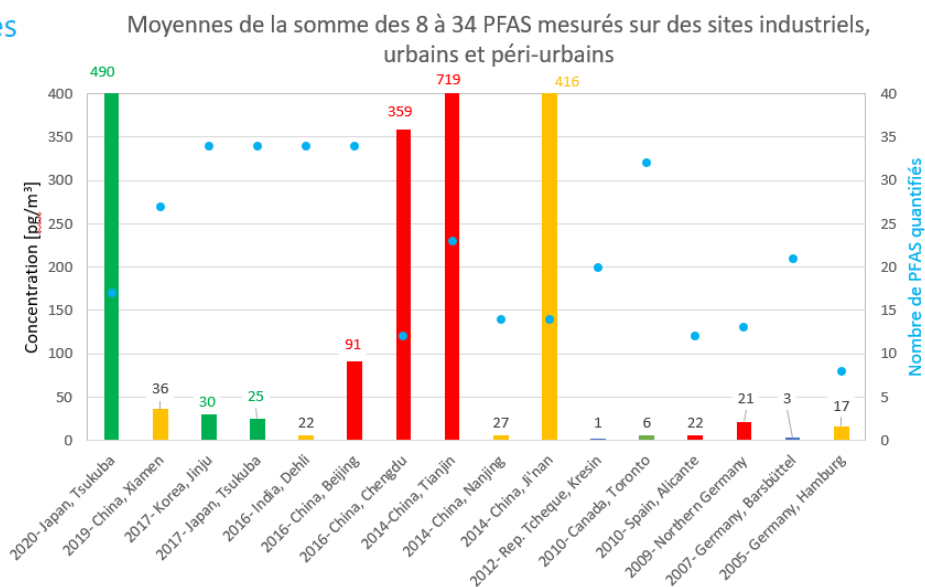
En France, des mesures en prélèvement passif sur PUF ont été effectuées durant 90 jours sur 13 points de mesure, à la demande de la DREAL, aux abords d'un site industriel, près de Lyon. Les concentrations les plus importantes concernent le PFHxA et le 6 :2 FTS évaluées à 241 ng/échantillon et 179 ng/échantillon , respectivement. Par ailleurs, l'ANSES a mené des investigations en 2022 aux abords de ce site et a mesuré la présence de PFAS dans les sols et les poussières (jusqu'à 245 ng/g de poids sec) (Dauchy 2023). A notre connaissance, à ce jour, il n'existe pas d'autre étude de caractérisation de PFAS en air ambiant en France.

Quelques laboratoires d'analyses (Biomérieux Nutrisciences, SGS, Eurofins...) proposent à ce jour d'identifier et de quantifier entre 20 et 50 composés PFAS sur des prélèvements d'air ambiant pour un coût entre 250 € et 1000 € l'analyse.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mène depuis fin 2023 une campagne exploratoire par prélèvement actif en air ambiant sur la Métropole de Lyon avec de premières conclusions attendues d'ici la fin 2024.

Les PFAS

Mesures existantes



Adapté de Faust 2023

Législation et valeur toxicologique de référence

La convention de Stockholm (règlement POP), accord international (2001) visant à encadrer certains polluants organiques persistants, réglemente plusieurs composés de la famille des PFAS au niveau mondial : interdiction à l'import, à l'export et à la production du PFOS depuis 2009, du PFOA depuis 2020, et du PFHxS (Acide perfluorohexanesulfonique) depuis 2022 (REACH). L'ECHA ([European Chemical Agency](#)) étudie actuellement une proposition conjointe datant du 13 janvier 2023 émanant de l'Allemagne, du Danemark, des Pays-Bas, de la Norvège et de la Suède afin de restreindre l'utilisation et l'émission dans l'environnement de l'ensemble des PFAS. En France, le gouvernement a lancé en janvier 2023 un [plan d'action ministériel](#) 2023-2027 sur les PFAS avec comme objectif de « renforcer la protection des français et de l'environnement cona lantre les risques liés à ces substances ». Dans le Rhône des [arrêtés préfectoraux](#) ont été pris en 2023 pour imposer aux industriels Arkema et Daikin d'effectuer des contrôles réguliers de PFAS dans leurs rejets atmosphériques.

Actuellement, seules les eaux sont surveillées en Europe, en effet l'annexe I de la [directive européenne EDCH](#) sur les eaux destinées à la consommation humaine du 16 décembre 2020 fixe des teneurs maximales à respecter pour les eaux potables (0,50 µg/l pour le total des PFAS ; ou 0,10 µg/l pour la somme des 20 PFAS substances préoccupantes) ; en France le programme de surveillance de l'état des eaux de la France récemment révisé par [l'arrêté du 26 avril 2022](#) qui intègre pour les eaux souterraines les 20 PFAS listés par la directive EDCH de décembre 2020, et le PFOS pour les eaux de surface.

A ce jour, il n'existe pas de norme ou de valeur limite maximale pour la présence des PFAS dans l'air. Des données de toxicité humaine sont disponibles pour PFOS, PFOA, PFHxA, PFDA et PFNA, mais il n'existe que très peu de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par inhalation pour l'ensemble des composés. Le PFOA et le PFOS sont classés cancérogènes par le CIRC.

A titre d'exemple l'EFSA évalue à 0.63 ng/kg de Poids Corporel et par jour (ng/kgPC/j) la **dose journalière acceptable** pour le PFOA, le PFOS, le PFNA et le PFHxS. Par ailleurs, l'US-EPA fournit une dose ingérable de référence chronique de 3 ng/kgPC/jour pour le GenX (PFAS de substitution au PFOA interdit), 20 ng/kgPC/jour pour le PFOA ou le PFOS et jusqu'à 300 ng/kgPC /jour pour le PFBS (acide sulfonique perfluorobutane). La figure en annexe 2 présente l'ensemble des risques des PFAS pour la santé.

L'évaluation des risques ne peut pas considérer l'effet de mélange des 9000 à 12000 composés PFAS, car il n'existe actuellement pas de VTR pour chacun. Les études épidémiologiques doivent se multiplier, et il est important de noter qu'une simple application des valeurs limites ne prend pas en compte les éventuels effets « cocktails » des mélanges de ces substances dans le corps humain, avec au minimum une prise en compte de l'additivité des risques des polluants ayant les mêmes cibles et effets toxicologiques. En France, une étude d'imprégnation de la population française par les PFAS, nommée ESTEBAN, a été menée de 2014 à 2016 par Santé Publique France. Les résultats montrent que le PFOA et le PFOS sont présents dans le sang de la totalité des individus de la cohorte. L'imprégnation sérique moyenne est de 4.03 µg/l-1 pour le PFOS et de 2.08 µg/l-1 pour le PFOA.

Le nombre de composés PFAS distincts continue de s'accroître, certains groupes de recherche évoque un nombre qui dépasserait largement les 12000 composés. Face à l'émergence de ces polluants, les techniques de prélèvement et d'analyse doivent être améliorées, notamment dans l'air. Quelques groupes de recherche mènent des investigations dans l'atmosphère, mais les mesures de PFAS en air ambiant à une échelle régionale ou nationale n'ont pas encore vu le jour.

Bibliographie

- Baduel, Christine, Jochen F. Mueller, Anna Rotander, John Corfield, et Maria-José Gomez-Ramos. 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 (octobre): 1030-38. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.096>.
- Barber, Jonathan L., Urs Berger, Chakra Chaemfa, Sandra Huber, Annika Jahnke, Christian Temme, et Kevin C. Jones. 2007. « Analysis of Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances in Air Samples from Northwest Europe ». *Journal of Environmental Monitoring* 9 (6): 530-41. <https://doi.org/10.1039/B701417A>.
- Bräunig, Jennifer, Christine Baduel, Craig M. Barnes, et Jochen F. Mueller. 2019. « Leaching and Bioavailability of Selected Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) from Soil Contaminated by Firefighting Activities ». *Science of The Total Environment* 646 (janvier): 471-79. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.231>.
- Brusseau, M. L., et B. Guo. 2022. « PFAS Concentrations in Soil versus Soil Porewater: Mass Distributions and the Impact of Adsorption at Air-Water Interfaces ». *Chemosphere* 302 (septembre): 134938. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134938>.
- Charbonnet, Joseph A., Carrie A. McDonough, Feng Xiao, Trever Schwichtenberg, Dunping Cao, Sarit Kaserzon, Kevin V. Thomas, et al. 2022. « Communicating Confidence of Per- and Polyfluoroalkyl Substance Identification via High-Resolution Mass Spectrometry ». *Environmental Science & Technology Letters* 9 (6): 473-81. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00206>.
- Cousins, Ian T., Jana H. Johansson, Matthew E. Salter, Bo Sha, et Martin Scheringer. 2022. « Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) ». *Environmental Science & Technology* 56 (16): 11172-79. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>.
- D'Ambro, Emma L., Havala O. T. Pye, Jesse O. Bash, James Bowyer, Chris Allen, Christos Efstathiou, Robert C. Gilliam, Lara Reynolds, Kevin Talgo, et Benjamin N. Murphy. 2021. « Characterizing the Air Emissions, Transport, and Deposition of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from a Fluoropolymer Manufacturing Facility ». *Environmental Science & Technology* 55 (2): 862-70. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06580>.
- Dauchy, Xavier. 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 (octobre): 139407. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139407>.

- Dixon-Anderson, Erik, et Rainer Lohmann. 2018. « Field-Testing Polyethylene Passive Samplers for the Detection of Neutral Polyfluorinated Alkyl Substances in Air and Water: Testing Passive Polyethylene Samplers for Neutral PFASs ». *Environmental Toxicology and Chemistry* 37 (12): 3002-10. <https://doi.org/10.1002/etc.4264>.
- Fang, Xiangguang, Qi Wang, Zhen Zhao, Jianhui Tang, Chongguo Tian, Yiming Yao, Junchao Yu, et Hongwen Sun. 2018. « Distribution and Dry Deposition of Alternative and Legacy Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Air above the Bohai and Yellow Seas, China ». *Atmospheric Environment* 192 (novembre): 128-35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.052>.
- Faust, Jennifer A. 2023. « PFAS on Atmospheric Aerosol Particles: A Review ». *Environmental Science: Processes & Impacts* 25 (2): 133-50. <https://doi.org/10.1039/D2EM00002D>.
- Fox, Radhika. 2022. « EPA's PFAS Strategic Roadmap: A Year of Progress ».
- Garnett, Jack, Crispin Halsall, Max Thomas, Odile Crabeck, James France, Hanna Joerss, Ralf Ebinghaus, Jan Kaiser, Amber Leeson, et Peter M. Wynn. 2021. « Investigating the Uptake and Fate of Poly- and Perfluoroalkylated Substances (PFAS) in Sea Ice Using an Experimental Sea Ice Chamber ». *Environmental Science & Technology* 55 (14): 9601-8. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01645>.
- Hammer, Jort, et Satoshi Endo. 2022. « Volatility and Nonspecific van der Waals Interaction Properties of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Evaluation Using Hexadecane/Air Partition Coefficients ». *Environmental Science & Technology* 56 (22): 15737-45. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05804>.
- Harrad, Stuart, Nina Wemken, Daniel Simon Drage, Mohamed Abou-Elwafa Abdallah, et Ann-Marie Coggins. 2019. « Perfluoroalkyl Substances in Drinking Water, Indoor Air and Dust from Ireland: Implications for Human Exposure ». *Environmental Science & Technology* 53 (22): 13449-57. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04604>.
- Jahnke, Annika, Jonathan L. Barber, Kevin C. Jones, et Christian Temme. 2009. « Quantitative Trace Analysis of Polyfluorinated Alkyl Substances (PFAS) in Ambient Air Samples from Mace Head (Ireland): A Method Intercomparison ». *Atmospheric Environment* 43 (4): 844-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.049>.
- James, Alun, Bernd Göckener, Belen Gonzalez-Gaya, Ruben Kause, Nicole Bandow, Leo Yeung, Pierre Labadie, Kelsey Flanagan, et Griet Jacobs. 2023. « 2023 PFAS Analytical Exchange TOP Assay Method Comparison ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25600.71681>.
- Joerss, Hanna, et Frank Menger. 2023. « The Complex 'PFAS World' - How Recent Discoveries and Novel Screening Tools Reinforce Existing Concerns ». *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 40 (avril): 100775. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100775>.
- Karásková, Pavlína, Garry Codling, Lisa Melymuk, et Jana Klánová. 2018. « A Critical Assessment of Passive Air Samplers for Per- and Polyfluoroalkyl Substances ». *Atmospheric Environment* 185 (juillet): 186-95. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.030>.
- Kim, Seung-Kyu, Mahiba Shoeib, Kyeong-Soo Kim, et Jong-Eun Park. 2012. « Indoor and Outdoor Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Korea Determined by Passive Air Sampler ». *Environmental Pollution* 162 (mars): 144-50. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.037>.
- Kourtchev, Ivan, Bruna G. Sebben, Anna Bogush, Ana Flavia L. Godoi, et Ricardo H.M. Godoi. 2023. « Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Urban PM2.5 Samples from Curitiba, Brazil ». *Atmospheric Environment*, juin, 119911. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119911>.
- Lai, Foon Yin, Cassandra Rauert, Laura Gobelius, et Lutz Ahrens. 2019. « A Critical Review on Passive Sampling in Air and Water for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) ». *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 121 (décembre): 115311. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.009>.
- Lin, Huiju, Jia-Yong Lao, Qi Wang, Yuefei Ruan, Yuhe He, Patrick K. H. Lee, Kenneth M. Y. Leung, et Paul K. S. Lam. 2022. « Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Atmosphere of Waste Management Infrastructures: Uncovering Secondary Fluorotelomer Alcohols, Particle Size Distribution, and Human Inhalation Exposure ». *Environment International* 167 (septembre): 107434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107434>.
- Lin, Huiju, Sachi Taniyasu, Eriko Yamazaki, Si Wei, Xinhong Wang, Nan Gai, Jin Hyo Kim, Heesoo Eun, Paul K. S. Lam, et Nobuyoshi Yamashita. 2020. « Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Air Particles of Asia: Levels, Seasonality, and Size-Dependent Distribution ». *Environmental Science & Technology* 54 (22): 14182-91. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03387>.

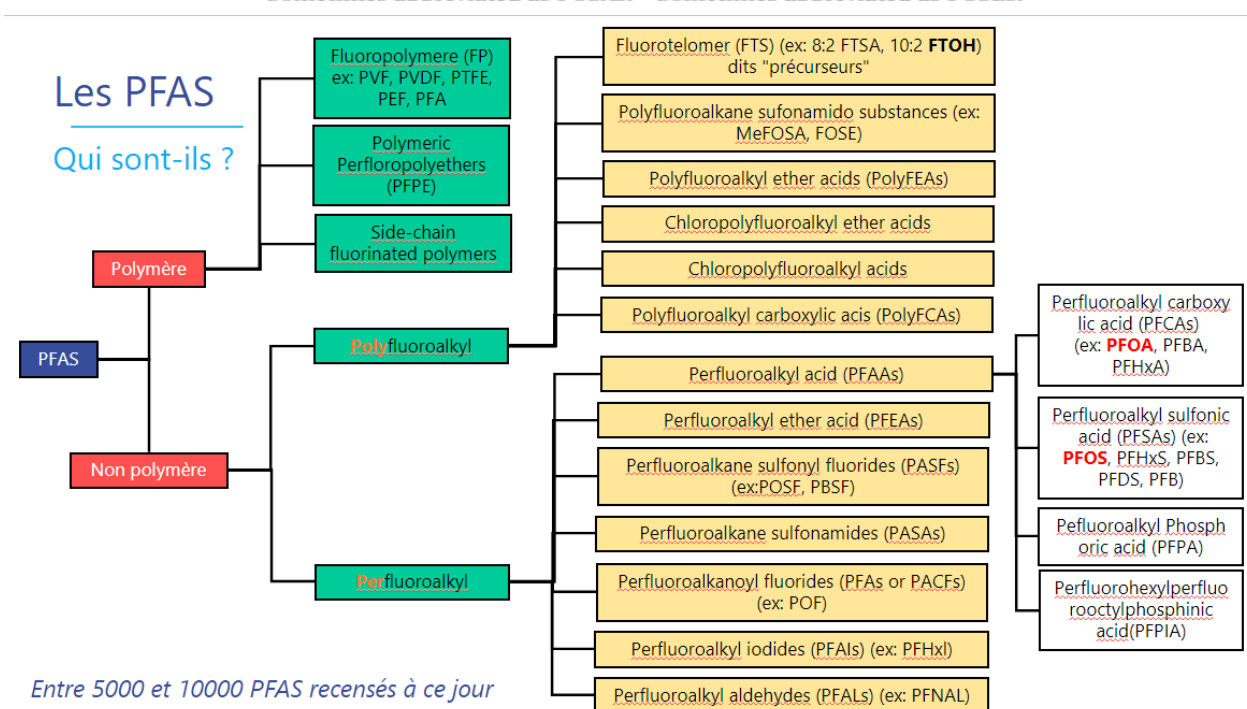
- Manz, Katherine E., Anna Feerick, Joseph M. Braun, Yong-Lai Feng, Amber Hall, Jeremy Koelmel, Carlos Manzano, et al. 2023. « Non-Targeted Analysis (NTA) and Suspect Screening Analysis (SSA): A Review of Examining the Chemical Exposome ». *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, juin. <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00574-6>.
- Melymuk, Lisa, Pernilla Bohlin, Ondřej Sáňka, Karla Pozo, et Jana Klánová. 2014. « Current Challenges in Air Sampling of Semivolatile Organic Contaminants: Sampling Artifacts and Their Influence on Data Comparability ». *Environmental Science & Technology* 48 (24): 14077-91. <https://doi.org/10.1021/es502164r>.
- Mohammed Taha, Hiba, Reza Aalizadeh, Nikiforos Alygizakis, Jean-Philippe Antignac, Hans Peter H. Arp, Richard Bade, Nancy Baker, et al. 2022. « The NORMAN Suspect List Exchange (NORMAN-SLE): Facilitating European and Worldwide Collaboration on Suspect Screening in High Resolution Mass Spectrometry ». *Environmental Sciences Europe* 34 (1): 1-26. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00680-6>.
- Morales-McDevitt, Maya E., Jitka Becanova, Arlene Blum, Thomas A. Bruton, Simon Vojta, Melissa Woodward, et Rainer Lohmann. 2021. « The Air That We Breathe: Neutral and Volatile PFAS in Indoor Air ». *Environmental Science & Technology Letters* 8 (10): 897-902. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00481>.
- Morales-McDevitt, Maya E., Matthew Dunn, Ahsan Habib, Simon Vojta, Jitka Becanova, et Rainer Lohmann. 2022. « Poly- and Perfluorinated Alkyl Substances in Air and Water from Dhaka, Bangladesh ». *Environmental Toxicology and Chemistry* 41 (2): 334-42. <https://doi.org/10.1002/etc.5255>.
- Nakayama, Shoji F., Mitsuha Yoshikane, Yu Onoda, Yukiko Nishihama, Miyuki Iwai-Shimada, Mai Takagi, Yayoi Kobayashi, et Tomohiko Isobe. 2019. « Worldwide Trends in Tracing Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment ». *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 121 (décembre): 115410. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.02.011>.
- Paragot, Nils, Jitka Bečanová, Pavlína Karásková, Roman Prokeš, Jana Klánová, Gerhard Lammel, et Céline Degrendele. 2020. « Multi-Year Atmospheric Concentrations of per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) at a Background Site in Central Europe ». *Environmental Pollution* 265 (octobre): 114851. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114851>.
- P. Thackray, Colin, Noelle E. Selin, et Cora J. Young. 2020. « A Global Atmospheric Chemistry Model for the Fate and Transport of PFCAs and Their Precursors ». *Environmental Science: Processes & Impacts* 22 (2): 285-93. <https://doi.org/10.1039/C9EM00326F>.
- Queron, Jessica, et Christophe Dutouquet. 2022. « Bibliographie_mesures_des_PFASS_dans_l-air_extérieur.pdf ». INERIS.
- Radi, Adam B., Kenneth E. Noll, et Ali K. Oskouie. 2022. « Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Background Information with Focus on Modeling of Fate and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Air Media ». *Journal of Environmental Engineering* 148 (6): 03122001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001989](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001989).
- Schaefer, Charles E., Veronika Culina, Dung Nguyen, et Jennifer Field. 2019. « Uptake of Poly- and Perfluoroalkyl Substances at the Air–Water Interface ». *Environmental Science & Technology* 53 (21): 12442-48. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04008>.
- Sha, Bo, Jana H. Johansson, Peter Tunved, Pernilla Bohlin-Nizzetto, Ian T. Cousins, et Matthew E. Salter. 2022. « Sea Spray Aerosol (SSA) as a Source of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) to the Atmosphere: Field Evidence from Long-Term Air Monitoring ». *Environmental Science & Technology* 56 (1): 228-38. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04277>.
- Stoiber, Tasha, Sydney Evans, et Olga V. Naidenko. 2020. « Disposal of Products and Materials Containing Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): A Cyclical Problem ». *Chemosphere* 260 (décembre): 127659. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127659>.
- Williams, Antony J., Linda G. T. Gaines, Christopher M. Grulke, Charles N. Lowe, Gabriel F. B. Sinclair, Vicente Samano, Inthirany Thillainadarajah, Bryan Meyer, Grace Patlewicz, et Ann M. Richard. 2022. « Assembly and Curation of Lists of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) to Support Environmental Science Research ». *Frontiers in Environmental Science* 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.850019>.

- Wolf, Martin J., Yue Zhang, Jiaqi Zhou, Jason D. Surratt, Barbara J. Turpin, et Daniel J. Cziczo. 2021. « Enhanced Ice Nucleation of Simulated Sea Salt Particles with the Addition of Anthropogenic Per- and Polyfluoroalkyl Substances ». *ACS Earth and Space Chemistry* 5 (8): 2074-85. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00138>.
- Wu, Rongben, Huiju Lin, Eriko Yamazaki, Sachi Taniyasu, Mattias Söregård, Lutz Ahrens, Paul K.S. Lam, Heesoo Eun, et Nobuyoshi Yamashita. 2021. « Simultaneous Analysis of Neutral and Ionizable Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Air ». *Chemosphere* 280 (octobre): 130607. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130607>.
- Yarwood, Greg, Susan Kembell-Cook, Michael Keinath, Robert L. Waterland, Stephen H. Korzeniowski, Robert C. Buck, Mark H. Russell, et Stephen T. Washburn. 2007. « High-Resolution Atmospheric Modeling of Fluorotelomer Alcohols and Perfluorocarboxylic Acids in the North American Troposphere ». *Environmental Science & Technology* 41 (16): 5756-62. <https://doi.org/10.1021/es0708971>.
- Zhao, Zhen, Xianghui Cheng, Xia Hua, Bin Jiang, Chongguo Tian, Jianhui Tang, Qilu Li, et al. 2020. « Emerging and Legacy Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Water, Sediment, and Air of the Bohai Sea and Its Surrounding Rivers ». *Environmental Pollution* 263 (août): 114391. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114391>.
- Zhou, J., K. Baumann, R. N. Mead, S. A. Skrabal, R. J. Kieber, G. B. Avery, M. Shimizu, et al. 2021. « PFOS Dominates PFAS Composition in Ambient Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Collected across North Carolina Nearly 20 Years after the End of Its US Production ». *Environmental Science: Processes & Impacts* 23 (4): 580-87. <https://doi.org/10.1039/D0EM00497A>.
- Zhou, Jiaqi, Karsten Baumann, Jason D. Surratt, et Barbara J. Turpin. 2022. « Legacy and Emerging Airborne Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Collected on PM_{2.5} Filters in Close Proximity to a Fluoropolymer Manufacturing Facility ». *Environmental Science: Processes & Impacts* 24 (12): 2272-83. <https://doi.org/10.1039/D2EM00358A>.

Annexe 1

| Acronym | Name |
|--------------------|--|
| FASAAs | Perfluoroalkyl sulfonamido acetic acids |
| FASACs | Perfluoroalkane sulfonamidoethyl acrylates |
| FASAs ^a | Perfluoroalkane sulfonamides |
| FASEs ^b | Perfluoroalkane sulfonamido ethanols |
| FASMACs | Perfluoroalkane sulfonamidoethyl methacrylates |
| FDIAs | Perfluorinated diiodofluoroalkanes |
| FTACs | Fluorotelomer acrylates |
| FTALs | Fluorotelomer aldehydes |
| FTCAs | Fluorotelomer carboxylic acids |
| FTIs | Fluorotelomer iodides |
| FTMACs | Fluorotelomer methacrylates |
| FTOHs | Fluorotelomer alcohols |
| FTOs | Fluorotelomer olefins |
| FTSAs | Fluorotelomer sulfonic acids |
| FTUCAs | Fluorotelomer unsaturated carboxylic acids |
| PAFs | Perfluoroalkanoyl fluorides |
| PAPs | Polyfluoroalkyl phosphoric acid esters, polyfluoroalkyl phosphates, fluorotelomer phosphates |
| PASFs | Perfluoroalkane sulfonyl fluorides |
| PFAAs | Perfluoroalkyl acids |
| PFAIs | Perfluoroalkyl iodides |
| PFALs | Perfluoroalkyl aldehydes |
| PFCAs | Perfluoroalkyl carboxylic acids |
| PFECAs | Perfluoroalkyl ether carboxylic acids |
| PFESAs | Perfluoroalkane ether sulfonic acids |
| PFPAs | Perfluoroalkyl phosphonic acids |
| PFPiAs | Perfluoroalkyl phosphinic acids |
| PFSAs | Perfluoroalkane sulfonic acids |
| PFSiAs | Perfluoroalkane sulfinic acids |
| SFAenes | Semifluorinated alkenes |
| SFAs | Semifluorinated alkanes |

^a Sometimes abbreviated as FOSAs. ^b Sometimes abbreviated as FOSES.



PFAS | CE QU'IL FAUT RETENIR

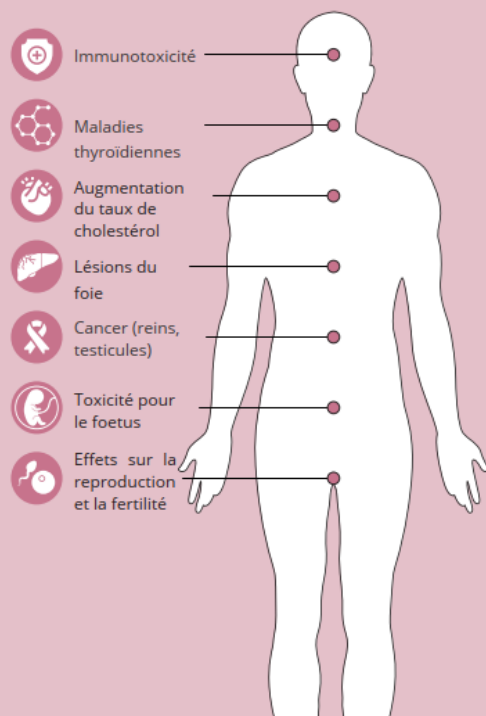
1 Possible sources d'exposition

- Poussière domestique
- Exposition professionnelle (fabrication de PFAS, pompiers, fartage...)
- Produits ménagers
- Produits de soins
- Lait maternel
- Eau potable contaminée
- Aliments contaminés
- Produits alimentaires

2 Comment peuvent-ils pénétrer dans le corps ?

- Par inhalation
- Par voie cutanée
- Par ingestion

3 Comment les PFAS peuvent-ils affecter votre santé ?



4 Comment réduire votre exposition aux PFAS ?

- Évitez les fast-foods emballés dans du papier anti-graisse
 - Évitez les fast-foods vendus dans des cartons contenant des PFAS (Pizza)
 - Évitez d'utiliser des sprays imperméabilisants (vêtements, chaussures)
 - Demandez des produits exempts de PFAS (pas seulement les PFOS et PFOA)
 - Vérifiez si un produit contient ou non des PFAS dans les applications en ligne.
 - Optez pour des ustensiles en céramique, acier inoxydable ou fonte
- Si vous vivez dans ou à proximité de zones connues pour être contaminées par des PFAS :**
- Évitez de pêcher et de consommer du poisson provenant de ces zones
 - Évitez de consommer des fruits et légumes cultivés dans ces régions. Demandez aux autorités locales d'évaluer les niveaux de PFAS pour vous assurer qu'il n'y en a pas.
 - Veuillez suivre les conseils des autorités pour l'utilisation de l'eau

The EU has taken action to reduce people's exposure to PFAS. For example, PFOS, its salts and derivatives as well as PFOA, its salts and PFOA-related compounds are banned under the Regulation on Persistent Organic Pollutants. The [European Food Safety Authority](#) has defined a limit for the volume of four PFAS that may be safely consumed in food in a one-week period. EU REACH restrictions are also adopted for PPHAS in C9-C14 PFAS and will be effective in the coming years for several uses. Also, the Drinking Water Directive sets limit values for PFAS in water for human consumption. Most recently, the Chemicals Strategy for Sustainability set out a range of actions to regulate PFAS as a group, including phasing out the use of [PFAS in the EU](#), unless their use is essential.

Pour plus d'informations sur la manière dont l'EU protège les citoyens, consultez la fiche [HBM4EU PFAS Factsheet](#).

Où peut-on les trouver ?

Les PFAS sont présents dans les produits de consommation (emballages alimentaires, ustensiles de cuisine), de soins (shampooing, fil dentaire, vernis, maquillage), de nettoyage, de rénovation (peintures, vernis, lubrifiants, mastics), les tissus d'ameublement, les tapis.

On peut également les trouver dans l'eau potable contaminée (à proximité des usines de fabrication, des installations de traitement des déchets, des sites de lutte contre les incendies, des aéroports) ou dans les denrées alimentaires (poisson, viande, fruits, œufs, légumes et végétaux).



Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 733032.

www.hbm4eu.eu

HBM4EU coordinator:
 German Environment Agency hbm4eu@uba.de
Knowledge Hub coordinator:
 European Environment Agency hbm4eu@eea.europa.eu