



Substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS)¹

Les retombées atmosphériques issues des émissions d'une ICPE, constituées de gaz et/ou de particules, pourront conduire, en fonction des substances et de l'usage des milieux, à une exposition directe (par inhalation) ou indirecte (par ingestion) des populations. L'objectif d'une surveillance environnementale est donc de disposer de résultats de mesure qui vont permettre de déterminer si ces retombées atmosphériques risquent de dégrader l'environnement et le cas échéant si cette dégradation peut provoquer des effets sanitaires sur la population générale. Le Guide sur la surveillance dans l'air autour des installations classées s'attache à expliquer la méthodologie générale pour réaliser correctement une surveillance environnementale.

Le présent document, quant à lui, complète le Guide général en présentant les principales caractéristiques physico-chimiques, les valeurs de gestion et niveaux mesurés dans l'air ambiant et/ou dans les dépôts atmosphériques, ainsi que les méthodes de mesures appropriées pour une substance donnée.

A ce jour, aucune méthode ou norme n'est disponible pour la réalisation de prélèvements et d'analyses de PFAS dans les retombées atmosphériques. Des travaux en normalisation française (à l'AFNOR) et européenne (au CEN) ont été initiés en 2025 pour proposer des méthodes qui permettront d'harmoniser les pratiques. Cette fiche recense les grands principes de prélèvement et d'analyse des PFAS dans les retombées atmosphériques, et sera amendée au fur et à mesure des avancements des travaux de normalisation.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Milieux et Impacts sur le Vivant

Rédaction : QUERON Jessica, EL-MASRI Ahmad

Vérification : BIAUDET Hugues, ROTUREAU Patricia, MIGNE Virginie

Approbation : LEOZ Eva

1. Physico-chimie

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS, de l'anglais per- and polyfluoroalkyl substances) sont, au sens de la définition produite par l'**Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE)**² des molécules formées d'une chaîne d'atomes de carbone plus ou moins longue, linéaire, ramifiée ou cyclique, et contenant au moins un groupement fluoré, soit méthyl ou méthylène, saturé et complètement fluoré. À ce squelette fluorocarboné peuvent s'ajouter différents groupes fonctionnels, qui confèrent à ces molécules des propriétés physiques, chimiques et toxicologiques distinctes.

Les PFAS sont d'origine anthropique. Ils sont très utilisés dans l'industrie et appréciés pour leur durabilité. Ils sont utilisés par exemple comme : lubrifiants, dans les matières textiles pour résister à l'eau, dans les ustensiles de cuisine et les emballages alimentaires pour ne citer que quelques exemples.

Les PFAS sont une large famille de substances synthétisées depuis les années 1940-1950. Ces composés contiennent des liaisons carbone fluor, celles-ci étant particulièrement fortes. Cet aspect joue un rôle important dans le comportement de ces substances dans l'environnement où elles ont tendance à persister et à ne pas se dégrader facilement. Elles peuvent donc s'accumuler dans divers compartiments environnementaux (eau, sol, air, sédiments...). Leur impact sur la santé humaine, animale et les écosystèmes font l'objet de fortes préoccupations.

Les données scientifiques portant sur les PFAS et leurs effets potentiels sur la santé humaine sont abondantes et s'enrichissent continuellement. Le degré de certitude attribué aux divers effets est variable. Parmi les effets connus pour l'être humain, on compte l'augmentation du taux de cholestérol, des cancers, des effets sur la fertilité et le développement du fœtus, sur le foie, sur les reins, etc. Les PFAS sont également suspectés d'interférer avec le système endocrinien (thyroïde) et immunitaire. Des effets peuvent survenir sur les autres organismes vivants. Certains PFAS s'accumulent dans les organismes vivants, plantes et animaux, et se retrouvent dans la chaîne alimentaire. D'autres, plus mobiles, sont transportés sur de très longues distances par l'eau ou l'air et peuvent se retrouver jusque dans les océans.

Il convient de noter que, selon l'EFSA (2020)³, les produits de la mer, les œufs et les viandes sont les aliments contribuant le plus à l'exposition au PFOS et au PFOA. D'après l'étude de biosurveillance ESTEBAN menée par Santé Publique France (2021)⁴, l'alimentation (incluant l'eau de boisson) constitue la principale voie d'exposition de la population générale aux PFAS. D'autres sources d'exposition existent, comme l'air intérieur et extérieur, les poussières et les sols. L'exposition professionnelle aux PFAS peut également se produire dans plusieurs secteurs industriels, comme l'industrie chimique, le traitement de textiles, la fabrication de produits électroniques, les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies ou encore les sites de traitement des déchets. Les niveaux d'imprégnation les plus élevés sont relevés chez les travailleurs de sites de fabrication de PFAS (ECHA, 2023⁵).

2. Quels PFAS considérer ?

Une classification par l'EPA (Environmental Protection Agency) des PFAS par rapport à leurs propriétés physico-chimiques (volatilité vs polarité) permet de regrouper ces composés en fonction des méthodes de surveillance et d'analyse adaptées à leurs caractéristiques, notamment dans le domaine des émissions atmosphériques.

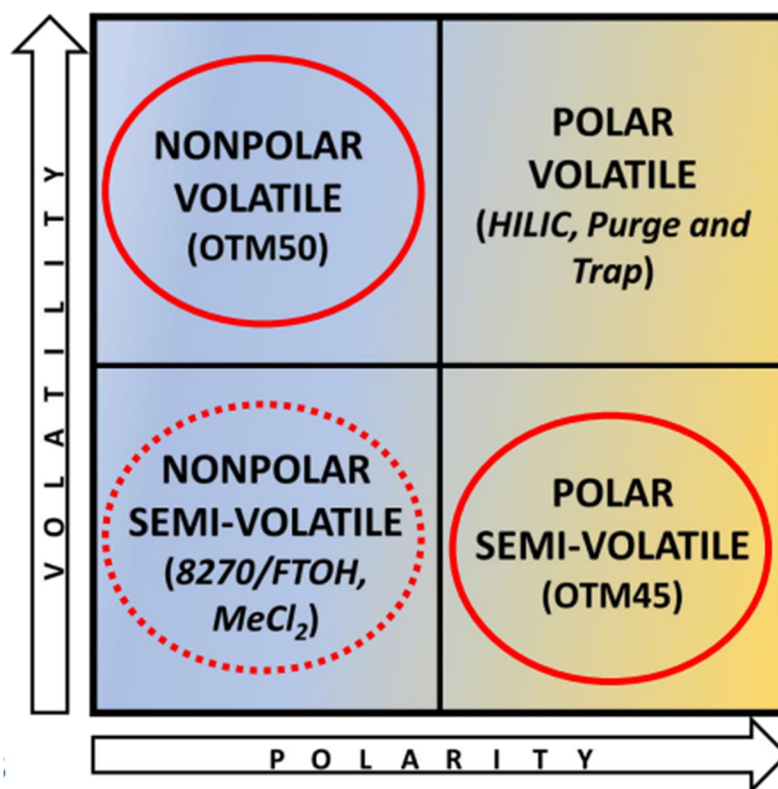


Figure 1 : Classification des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des PFAS dans l'air ⁶

2.1. PFAS semi-volatils polaires

Dans l'atmosphère, les PFAS peuvent se retrouver sous **forme semi-volatile**. La norme XP X43-126 (AFNOR, 2024⁷), issue de la méthode EPA OTM-45 (US EPA 2025⁸), décrit une méthode de mesurage manuelle applicable au prélèvement et à l'analyse quantitative de 49 composés PFAS semi-volatils polaires sous forme gazeuse et liés aux particules dans les émissions atmosphériques de sources fixes. Les 49 composés PFAS semi-volatils polaires sont listés dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Liste des PFAS semi-volatils polaires

Nom	Abréviation	N° CAS
Acides perfluorocarboxyliques (PFCAs)		
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	375-22-4
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	2706-90-3
Acide perfluorohexanoïque	PFHxA	307-24-4
Acide perfluoroheptanoïque	PFHpA	375-85-9
Acide perfluorooctanoïque	PFOA	335-67-1
Acide perfluorononanoïque	PFNA	375-95-1
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	335-76-2
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnDA	2058-94-8
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA	307-55-1
Acide perfluorotridécanoïque	PFTTrDA	72629-94-8
Acide perfluorotétradécanoïque	PFTeDA	376-06-7
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA	67905-19-5
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	16517-11-6
Acides perfluorosulfoniques (PFSA's)		
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	375-73-5
Acide perfluoropentanesulfonique	PFPeS	2706-91-4
Acide perfluorohexane sulfonique	PFHxS	355-46-4
Acide perfluoroheptane sulfonique	PFHpS	375-92-8
Acide perfluorooctane sulfonique	PFOS	1763-23-1
Acide perfluorononane sulfonique	PFNS	68259-12-1
Acide perfluorodécane sulfonique	PFDS	335-77-3
Acide perfluorododécane sulfonique	PFDoDS	79780-39-5
Sulfonamides perfluorés (FOSA's)		
Perfluoro-1-octanesulfonamide	FOSA	754-91-6
N-méthyle perfluorooctane sulfonamide	N-MeFOSA	31506-32-8
N-éthyle perfluorooctane sulfonamide	N-EtFOSA	4151-50-2
2-(N-méthylperfluoro-1-octane sulfonamido)-éthanol	N-MeFOSE	24448-09-7
2-(N-éthylperfluoro-1-octane sulfonamido)-éthanol	N-EtFOSE	1691-99-2
Acide N-méthyle perfluorooctane sulfonamido acétique	N-MeFOSAA	2355-31-9
Acide N-éthyle perfluorooctane sulfonamido acétique	N-EtFOSAA	2991-50-6
Acides sulfoniques de fluorotélomère (FTS)		
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorohexane sulfonique	4:2 FTSA	757124-72-4
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique	6:2 FTSA	27619-97-2
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorodécane sulfonique	8:2 FTSA	39108-34-4
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorododécane sulfonique	10:2 FTSA	120226-60-0
Fluorinated Replacement Chemicals / Composés chimiques fluorés de remplacement		
Acide 4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoïque	ADONA	919005-14-4
Acide dimère d'oxyde d'hexafluoropropylène	HFPO-DA (GenX)	13252-13-6
Acide 9-chlorohexadécafluoro-3-oxanonane-1-sulfonique	9CI-PF3ONS (F-53B majeur)	756426-58-1
Acide 11-chloroeicosafluoro-3-oxaundécane-1 sulfonique	11CI-PF3OUdS (F-53B mineur)	763051-92-9

Tableau 1 (suite) : Liste des PFAS semi-volatils polaires

Nom	Abréviation	N° CAS
Autres composés		
Acide nonafluoro-3,6-dioxaheptanoïque	NFDHA	151772-58-6
Acide perfluoro(2-ethoxyéthane) sulfonique	PFEESA	113507-82-7
Acide perfluoro-4-methoxybutanoïque	PFMBA	863090-89-5
Acide perfluoro-3-methoxypropanoïque	PFMPA	377-73-1
Acide Decafluoro-4-(pentafluoroéthyl)cyclohexanesulfonique	PFecHS	646-83-3
Acide 2H-perfluoro-2-décenoïque	8:2 FTUCA (FOUEA)	70887-84-2
Acide 2H,2H-perfluorododecanoïque (Acide 2-perfluorodécyl ethanoïque)	10:2 FTCA (10:2 FDEA)	53826-13-4
Acide 2H,2H-perfluorodecanoïque (Acide 2-perfluorooctyl ethanoïque)	8:2 FTCA (8: FOEA)	27854-31-5
Acide 2H-perfluoro-2-octenoïque	6:2 FTUCA (6:2 FHUEA)	70887-88-6
Acide 2H,2H perfluorooctanoïque (Acide 2-perfluorohexyl ethanoïque)	6:2 FTCA (6:2 FHEA)	53826-12-3
Acide 2H,2H,3H,3H-perfluorohexanoïque (Acide 3-perfluoropropyl propanoïque)	3:3 FTCA (FPrPA)	356-02-5
Acide 2H,2H,3H,3H-perfluorooctanoïque (Acide 3-perfluoropentyl propanoïque)	5:3 FTCA (FPePA)	914637-49-3
Acide 2H,2H,3H,3H-perfluorodecanoïque (Acide 3-perfluoroheptyl propanoïque)	7:3 FTCA (FHpPA)	812-70-4

2.2. PFAS volatils non polaires

La méthode EPA OTM-50 (US EPA, 2025⁹) décrit une méthode de mesurage manuelle applicable au prélèvement et à l'analyse de 30 composés, per et polyfluoroalkylés et autres molécules fluoro-carbonées volatiles, sous forme gazeuse dans les émissions atmosphériques de sources fixes. Les 30 composés dont certains PFAS volatils sont listés dans le tableau ci-après.

Tableau 2 : Liste des PFAS volatils non polaires et autres composés fluorés volatils

Nom	N° CAS	Nom	N° CAS
Carbon tétrafluoride	75-73-0	Heptafluoropropyl-1,2,2,2-tétrafluoroéthyl ether (E1)	3330-15-2
Hexafluoroéthane (FC-116)	76-16-4	1H-Perfluorohexane	355-37-3
Tétrafluoroéthène	116-14-3	1H-Perfluoroheptane	375-83-7
Trifluorométhane (HFC-23)	75-46-7	2H-Perfluoro-5-méthyl-3,6-dioxanonane (E2)	3330-14-1
Octafluoropropane	76-19-7	1H-Perfluorooctane	335-65-9
Difluorométhane (HFC-32)	75-10-5	Octadecafluorooctane	307-34-6
Fluorométhane (HFC-41)	593-53-3	1H-Nonafluorobutane	375-17-7
Pentafluoroéthane (HFC-125)	354-33-6	1H-Heptafluoropropane	2252-84-8
Hexafluoropropène	116-15-4	1,1,1,2-Tétrafluoroéthane (HFC-134a)	811-97-2
Hexafluoropropène oxide (HFPO)	428-59-1	1,1,1-Trifluoroéthane (HFC-143a)	420-46-2
Decafluorobutane	355-25-9	Chlorodifluorométhane (HCFC-22)	75-45-6
Dodecafluoropentane	678-26-2	Chlorotrifluorométhane (CFC-13)	75-72-9
Tétradecafluorohexane	355-42-0	Octafluorocyclobutane (FC-C318)	115-25-3
1H-Perfluoropentane	375-61-1	Octafluorocyclopentène (FC-C1418)	559-40-0
Hexadecafluoroheptane	335-57-9	Trichloromonofluorométhane (CFC-11)	75-69-4

2.3. PFAS volatils polaires à chaîne ultra-courte

Parmi les PFAS, il convient aussi de citer les PFAS volatils polaires à chaîne ultra-courte (<C4) en particulier l'acide trifluoroacétique, le TFA (CAS : 76-05-1), considéré comme un PFCA à chaîne ultra-courte. Il suscite de plus en plus de préoccupations de la part des scientifiques (Arp, 2024¹⁰), compte-tenu de son caractère persistant, des émissions directes et indirectes (liées notamment à la dégradation de produits comme les gaz fluorés) et à sa présence ubiquitaire dans l'environnement, qui sont déjà bien supérieures à celles des autres acides perfluoroalkylés (PFAA).

Les études dans lesquelles le TFA est recherché montrent que cette substance est retrouvée avec une fréquence et des concentrations beaucoup plus élevées que les autres substances (notamment dans les eaux souterraines et superficielles²⁰).

2.4. PFAS semi-volatils non polaires

Ce groupe de PFAS regroupe plusieurs familles dont les fluorotélomères sulfonates (FTS), les fluorotélomères alcools (FTOH), etc. qui, en raison de leur propriété semi-volatile, peuvent se retrouver dans l'air avec des concentrations importantes (Wallace et al., 2024¹¹ et, Ahrens et al., 2012¹²).

Le suivi des FTS est couvert par la XP X 43-126 et l'OTM 45. En revanche, il n'existe pas encore de méthode normalisée pour l'analyse des FTOH dans le domaine de l'air à l'émission, de l'air ambiant ou les retombés atmosphériques. Seules quelques publications scientifiques décrivent différentes méthodes de piégeage et d'analyse de ces composés dans l'air, qui nécessitent, dans la majorité des cas des supports spécifiques et une voie analytique dédiée.

2.5. Bilan

Parmi la grande famille des PFAS :

- Les plus connus sont : le PFOA, le PFOS et le TFA.
- Les plus fréquemment détectés dans l'air sont : les FTOH, FASA et FASE (Wallace et al., 2024¹³). Les FTOH peuvent représenter plus de 80% des PFAS dans l'air en zone urbaine (Ahrens et al., 2012¹²),
- Les plus connus scientifiquement sont les PFAA, substances non dégradables.

Les molécules produites ont évolué au cours du temps : les PFAA à chaîne longue, en particulier le PFOS et le PFOA, ont été remplacés par exemple par des PFAA à chaîne courte, des composés basés sur des fluorotélomères ou des acides carboxyliques per ou polyfluoroalkyl éthers (comme l'ADONA ou le HPFO-DA correspondant au GenX), d'où une coexistence de PFAS de différents types dans les milieux.

Selon les groupes, ils peuvent avoir des propriétés très différentes. Dans l'environnement, les PFAA se présentent ainsi principalement sous forme ionique et sont donc solubles, mais il existe aussi des polyfluorés sous forme neutre, qui sont volatils (comme le CF₄, le C₂F₆, les fluorotélomères alcools ...). Par ailleurs, beaucoup de composés utilisés pour remplacer les PFAA sont des précurseurs de ces PFAA et sont dégradés par des processus abiotiques et par les organismes biologiques (incluant les mammifères) en acides carboxyliques et sulfoniques perfluoroalkylés (PFCA et PFSA), non dégradables en conditions environnementales.

3. Valeurs de gestion dans l'air ambiant¹⁴

Jusqu'à présent, la réglementation, qu'elle soit européenne ou nationale, a avant tout ciblée quelques substances spécifiques de la famille des PFAS. Cette approche est en train d'évoluer pour mieux prendre en compte les risques que présentent l'ensemble des molécules de cette famille.

Le règlement POP (polluants organiques persistants)¹⁵ issu de la convention de Stockholm¹⁶ a interdit le PFOS (acide perfluorooctanesulfonique) depuis 2009, le PFOA (acide perfluorooctanoïque) depuis juillet 2020 et le PFHxS (acide perfluorohexanesulfonique) depuis juin 2022. Au regard de leur caractère persistant dans l'environnement, le PFOS, le PFOA et le PFHxS sont encore fréquemment mesurés dans l'environnement.

Certains PFAS, non polymérisés, sont enregistrés au titre de REACH. Par ailleurs, certains PFAS ou groupes de PFAS font l'objet de restriction de mise sur le marché ou d'utilisation dans l'Union Européenne. C'est le cas des acides perfluorocarboxyliques (PFCA C9-C14) ou encore de l'acide perfluorohexanoïque (PFHxA). D'autres restrictions sont en cours d'examen au niveau européen.

3.1. Concentration dans l'air ambiant

A ce jour, il existe des valeurs toxicologiques de référence en France pour certaines substances spécifiques de la famille des PFAS mesurées dans l'air ambiant. En l'absence de donnée de toxicité par voie respiratoire, des valeurs toxicologiques indicatives (VTi) ont été construites par l'Anses¹⁷ en 2025 par extrapolation voie à voie à partir de la VTR orale.

Tableau 3 : Valeurs toxicologiques de référence de PFAS dans l'air ambiant en France proposées par l'Anses en 2025

PFAS	VTi Long terme inhalation (en µg/m³)
PFBA et sels	12,4
PFHxA	11
6:2 FTSA et sels	0,6

En Belgique flamande¹⁸, le VITO et ARCHE Consulting ont mené une étude dans laquelle des valeurs de test ont été établies pour déterminer la quantité maximale de PFAS pouvant être présente dans l'air. Des valeurs indicatives à ne pas dépasser ont été proposées pour 5 PFAS courants et la valeur de la somme des 4 PFAS EFSA¹ a été affinée et abaissée à 0,3 ng/m³.

Tableau 4 : Valeurs indicatives de PFAS dans l'air ambiant en Belgique flamande¹⁸

PFAS	Valeurs indicatives (en ng/m³)
Somme des PFAS EFSA-4	0,3
HFPO-DA	1,4
6:2 FTSA	30
PFBS	140
PFPrA	245
PFBA	460

¹ EFSA-4 désigne 4 substances PFAS : acide sulfonique perfluorooctanique (PFOS), acide perfluorooctanoïque (PFOA), acide perfluoronanoïque (PFNA), acide sulfonique perfluorohexane (PFHxS)

3.2. Dépôts atmosphériques

A ce jour, il n'existe aucune valeur de gestion pour les PFAS mesurés dans les dépôts atmosphériques en France.

En Belgique flamande¹⁸, des valeurs indicatives ont été proposées. A la demande du VMM (Vlaamse Milieumaatschappij, agence environnementale de Flandre en Belgique), VITO et ARCHE Consulting ont mené une étude dans laquelle des valeurs de test ont été établies pour déterminer la quantité maximale de PFAS pouvant être présente dans les dépôts atmosphériques.

Cette étude montre qu'avec un dépôt de 82,6 et 140 ng/m² par jour, respectivement pour le PFOS et le PFBA, la concentration dans les eaux souterraines montera à 100 ng/L avec le temps (2 ans pour le PFBA et 20 ans pour le PFOS). Par conséquent, l'étude recommande de fixer des normes de dépôt inférieures à 82,6 et 140 ng/m²/jour pour le PFOS et le PFBA, respectivement.

À long terme, l'objectif pour le PFOS devrait même être inférieur à 3,3 ng/m²/jour. Cette dernière valeur n'est pas encore atteignable car des valeurs plus élevées sont actuellement mesurées, même en zones rurales.

Tableau 5 : Valeurs indicatives dans les dépôts atmosphériques pour le PFOS et le PFBA pour la Belgique flamande¹⁸

PFAS	Valeurs indicatives (en ng/m ² /jour)
PFOS	82,6
PFBA	140

4. Niveaux mesurés dans différents types de milieux atmosphériques¹⁹

A ce jour, peu de données sont disponibles en France et à l'international. A ce jour, aucune méthode ou norme n'est disponible pour la réalisation de prélèvements et d'analyses de PFAS dans les retombées atmosphériques. Les niveaux sont donc donnés à titre indicatif, il est recommandé de vérifier si des données plus récentes ou plus spécifiques à la situation étudiée sont disponibles en France.

4.1. Concentrations dans l'air ambiant

L'Ineris²⁰ a rédigé un rapport sur l'identification des principales voies d'exposition aux PFAS en avril 2025.

L'ITRC, The Interstate Technology & Regulatory Council, rapporte en 2023²¹ des concentrations de PFOA et PFOS dans l'air généralement comprises entre 1 et 30 pg/m³. Autour de sites industriels, dont des sites producteurs de composés fluorés en Chine et en Corée, des valeurs maximales en PFOA comprises entre 50 et 200 pg/m³ ont été rapportées. Seo et al. (2019)²² ont mesuré dans des secteurs plus ou moins urbanisés et industrialisés d'un territoire, les concentrations de 13 PFAA et 6 PFAS neutres appartenant aux sous-groupes des acides carboxyliques et sulfoniques perfluorés (PFCA et PFSA), acides acétiques saturés et insaturés des fluorotélomères (FTCA et FTUCA) et acides acétiques de perfluoroalcane sulfonamide (FASAA). La somme des concentrations était de l'ordre de 150 pg/m³ dans la zone agricole, comprise entre 300 et 400 pg/m³ dans la zone résidentielle et entre 600 et 900 pg/m³ dans la zone urbaine comprenant plusieurs industries utilisant des PFAS.

Pour les FTOH, Titaley (2024) indiquent que les concentrations dans l'air près des usines de production et de traitement de textiles (médiane : 25 000 pg/m³, Q1-Q3 : 70 – 10⁶ pg/m³) sont deux à trois ordres de grandeur supérieures à celles des sites non industriels (médiane : 30 pg/m³, Q1-Q3 : 2 – 200 pg/m³) et un à deux ordres de grandeur supérieurs à celles mesurées près des sites de production de composés fluorés (médiane : 30 pg/m³, Q1-Q3 : 5 – 2500 pg/m³) ou des décharges (médiane : 200 pg/m³, Q1-Q3 : 20 – 2000 pg/m³). **Au niveau global, le 8:2 FTOH apparaît comme la molécule de FTOH dominante dans l'air, mais depuis les années 2020, dans la famille des FTOH, c'est le 6:2 FTOH qui est devenu dominant près des sites de production et de traitement de textile et les sites de production de composés fluorés.**

Wallington et al. (2006)²³ ont estimé selon des travaux de modélisation que 1 à 10% du PFOA dans l'air pourrait être lié à la dégradation du 8:2 FTOH.

4.2. Dépôts atmosphériques

A ce jour, il existe très peu de données pour les PFAS mesurés dans les dépôts atmosphériques en France.

Le dépôt humide est supposé jouer un rôle important dans la contamination des milieux terrestres et aquatiques, notamment dans la contamination de régions éloignées des sources d'émission.

5. Méthodes de mesures des concentrations

En fonction des PFAS, la voie d'exposition aux retombées atmosphériques peut être l'ingestion et/ou l'inhalation. Dans ce cas, les concentrations dans l'air des phases gazeuse et particulaire de ces substances et dans les dépôts atmosphériques doivent être mesurées en fonction des substances à rechercher. Ces prélèvements peuvent être réalisés par des méthodes manuelles actives ou passives donnant des résultats intégrés.

A ce jour, aucune méthode ou norme n'est disponible pour la réalisation de prélèvements et d'analyses de PFAS dans les retombées atmosphériques. Des travaux en normalisation française (à l'AFNOR) et européenne (au CEN) ont été initiés en 2025 pour proposer des méthodes qui permettront d'harmoniser les pratiques. Ce paragraphe recense les grands principes de prélèvement et d'analyse des PFAS dans les retombées atmosphériques, et sera amendé au fur et à mesure des avancements des travaux de normalisation.

5.1. Méthodes de prélèvement

5.1.1. Méthodes manuelles actives^{24, 25, 26}

A. PFAS semi-volatils

Préleveurs de la fraction PM_{10}

La distribution des PFAS selon la taille des particules (granulométrie) varie selon les classes de composés. En général, la majorité des PFAS se concentrent principalement dans les fractions de taille fine ou ultrafine des particules ($PM_{2,5}$ et $PM_{0,1}$), à l'exception notable du PFOS qui est généralement associé à la fraction grossière des aérosols ($> PM_{2,5}$ et $< PM_{10}$) (Faust, 2023²⁷; Li et al., 2024²⁸).

Le prélèvement de la fraction PM_{10} particulaire est réalisé à l'aide d'un appareil de prélèvement conforme à la norme NF EN 12341 sur un filtre en fibres de quartz. De ce fait, un appareil de référence ou des appareils équivalents à cette norme peuvent être utilisés, qu'ils soient à bas ou haut débit. La prochaine révision de cette norme prévoit de définir comme préleveurs de référence pour la fraction PM_{10} , des préleveurs moyens-débit fonctionnant à 2,3 m³/h. Compte tenu des limites de détection actuelles des laboratoires et des faibles concentrations en PFAS pouvant parfois être observées, l'utilisation de préleveur haut débit (15m³/h) muni d'une tête PM_{10} équivalente à celles décrites dans la norme NF EN 12341 est recommandée sur une durée adaptée à une surveillance des retombées atmosphériques autour d'un site industriel, soit sur 24h ou 48h.

L'analyse est ensuite réalisée par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) après une désorption chimique du support.

Prélèvements de la fraction gazeuse

Pour mesurer des PFAS en phase gazeuse, plusieurs supports existent, tels que les mousses en polyuréthane (PUF). Il existe également des sandwichs en mousses PUF avec de la résine XAD2 entre 2 mousses (cartouche de type Orbo 2500) en aval du filtre de collecte des particules, qui sont les supports les plus utilisés (Wallace et al, 2024¹³). D'autres supports de prélèvement existent avec une mousse PUF avec un adsorbant à base de charbon actif (GAIA) composé de fibres de résine synthétique dont les pores et l'activité de surface ont été optimisés, ce qui permet la collecte et l'élution des PFAS. Ces supports seraient particulièrement adaptés pour

le prélèvement des FTOH (Wu et al 2021²⁹). Des essais de comparaison de différents supports de prélèvements sont actuellement en cours d'étude par l'Ineris.

Des prélèvements actifs peuvent aussi être réalisés par pompage de l'air à échantillonner, à travers un support de type XAD7-OVS, à un débit de 1 L/min.

L'analyse est ensuite réalisée par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) ou par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem, en fonction des PFAS suivis, après une désorption chimique du support.

B. PFAS volatils non polaires

Les PFAS volatils non polaires peuvent être prélevés sur un canister, conformément aux préconisations de l'OTM-50. Les prélèvements s'effectuent sur une durée d'une heure dans un canister de 6L. Les canisters permettent le prélèvement simultané d'une large gamme de PFAS volatils. L'analyse est ensuite réalisée par chromatographie en phase gazeuse suivi d'une détection par spectromètre de masse, avec un mode d'injection spécifique par thermodésorption (ATD GC-MS/MS). Des travaux de normalisation AFNOR sont en cours pour la rédaction d'une norme française qui couvre cette famille de PFAS.

C. PFAS volatils polaires ultra-courts

A noter que dans la littérature, on peut retrouver plusieurs techniques analytiques pour cette famille de composés. Ils peuvent être déterminés par GC-MS après avoir été dérivatisés avec de la 2,4-difluoroaniline, par LC-MS/MS³⁰ ou CI-MS/MS³¹. Ces composés peuvent être prélevés par barbotages dans une solution alcaline pour la fraction gazeuse ou sur filtre pour la fraction particulaire.

5.1.2. Méthodes manuelles passives^{32, 33, 34}

Dépôts atmosphériques – PFAS semi-volatils polaires

Le prélèvement des PFAS dans les dépôts nécessite l'utilisation de jauges/collecteurs en PEHD. Les jauges sont filmées avec un plastique noir pour empêcher le développement d'algues.

Après le prélèvement, les jauges sont homogénéisées puis fractionnées pour une prise d'essai de 500 ml maximum. Une extraction via cartouche SPE est réalisée après avoir ajouté les étalons internes d'extraction. Une étape de concentration peut être ajoutée après l'extraction.

L'analyse est ensuite réalisée par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) après avoir injecté des marqueurs analytiques.

Après analyses, les jauges sont nettoyées avec une solution de MeOH / NH₄OH, puis avec de l'eau ultra pure et enfin séchées.

Des essais d'élargissement de la méthode de prélèvement par collecteurs PEHD pour intégrer de nouveaux composés avec des propriétés physico-chimiques différentes (semi-volatiles apolaire et polaires à chaîne courtes) sont en cours d'étude par l'Ineris.

5.2. Analyse des PFAS

Les PFAS étant omniprésents dans l'environnement, des précautions doivent donc être prises à toutes les étapes du prélèvement, comme de l'analyse au laboratoire, pour éviter des contaminations de l'échantillon. Les préconisations à prendre sont :

- de porter de gants neufs en nitrile,
- de ne pas porter des vêtements contenant du Gore-Tex® ou du Tyvek®,
- de ne pas utiliser de produits cosmétiques susceptibles de contenir des PFAS (crèmes hydratantes, vernis à ongle, mascara...),
- d'utiliser des flacons en polypropylène (PP) ou polyéthylène haute densité (PEHD),
- de proscrire tous les matériaux à base de polymères fluorés dont les septums (utiliser des bouchons pré-percés en forme d'étoile pour les flacons de passeur) et les tubulures ou matériaux en téflon dans les matériels d'extraction, d'évaporation, de concentration et dans les chaînes analytiques (remplacer par de l'inox, du PEHD, du Peek...),
- de veiller à conserver l'espace de travail propre et sans poussière,
- de n'utiliser que des réactifs et consommables (solvants, résines, cartouches SPE, cônes pour pipettes...) préalablement vérifiés pour l'absence de contamination en PFAS.

5.2.1. Préparation et traitement de l'échantillon

A. Nettoyage

Plusieurs sources de contamination peuvent être présentes dans les flacons. Il est fortement recommandé, avant l'utilisation du matériel de prélèvement ou de préparation, de rincer l'ensemble du matériel avec du méthanol ou avec une solution d'hydroxyde d'ammonium à 5 % dans le méthanol. Un rinçage à l'eau ultrapure peut être réalisé en amont pour éliminer les impuretés solides.

Certaines pratiques intègrent également un lavage supplémentaire au cyclohexane (LUC/VI/003³⁵) afin d'éliminer les éventuels composés organiques apolaires présents sur les parois des récipients.

Dans le cas des flacons de type jauges pour les dépôts atmosphériques, les pratiques appliquées à l'Ineris sont les suivantes : un rinçage initial à l'eau ultrapure, suivi d'un lavage au méthanol contenant 5 % (v/v) d'hydroxyde d'ammonium. Une agitation sur agitateur à rouleaux pendant 30 minutes est ensuite réalisée pour optimiser l'élimination des contaminants et garantir la fiabilité des analyses ultérieures.

Pour la préparation des supports solides, tels que les filtres et les résines, il est conseillé de se référer aux recommandations de la norme XP X43-126 (2024)⁷. Cette norme fournit des lignes directrices précises pour assurer une préparation standardisée et reproductible. Concernant les mousses PUF, un protocole similaire à celui utilisé pour les filtres et résines peut être adapté, en tenant compte des caractéristiques spécifiques de ce matériau.

B. Extraction

Extraction par phase solide (SPE) pour les matrices liquides

L'extraction par phase solide (SPE) est une technique permettant d'améliorer la sensibilité analytique en réduisant les limites de quantification, indépendamment du mode d'utilisation (en ligne ou hors ligne). Les protocoles expérimentaux peuvent s'appuyer sur les méthodes normalisées suivantes :

- Norme NF EN 17892 (2024)³⁶ relative à la qualité de l'eau : Utilisation de cartouches contenant un sorbant à échange d'anions faible (WAX, *Weak Anion eXchange*) ou des matériaux à balance hydrophile-lipophile (HLB).
- Norme XP X43-126 (2024)⁷ relative aux émissions de sources fixes : Utilisation de cartouches contenant un sorbant à échange d'anions faible (WAX, *Weak Anion eXchange*).

En termes de contrôle qualité, la réalisation de blancs d'extraction est indispensable pour s'assurer de l'absence de contamination du système d'extraction ou des cartouches SPE utilisées.

Extraction des supports solides

Pour les supports solides (filtres et résines), la norme XP X43-126 (2024)⁷ recommande une agitation dans une solution d'hydroxyde d'ammonium à 5 % (v/v) dans le méthanol, pendant une durée de 18 heures. Cette norme décrit également d'autres techniques d'extraction, notamment par solvant pressurisé.

C. Marqueurs

Plusieurs marqueurs sont disponibles pour les PFAS : des marquages isotopiques au carbone 13 (¹³C) ou au deutérium. Ces marqueurs peuvent être utilisés comme traceurs de prélèvement, traceurs d'extraction des échantillons ou traceurs d'analyse. Il convient de noter que leur utilisation engendre un coût supplémentaire significatif, leur prix étant beaucoup plus élevé que celui des composés natifs. De plus, pour certains PFAS, les homologues marqués correspondants ne sont pas nécessairement disponibles sur le marché.

- Marqueurs de prélèvement

Les marqueurs de prélèvement sont ajoutés dans/sur le support de prélèvement avant l'échantillonnage. Leur objectif est de vérifier que les molécules piégées restent fixées dans/sur le support tout au long du processus de prélèvement.

- Marqueurs d'extraction

Les marqueurs d'extraction visent à corriger les fluctuations de rendement d'extraction et, surtout, à compenser les effets de matrice qui peuvent impacter la réponse de l'appareil pour chaque molécule. Dans l'idéal, il faudrait pouvoir disposer d'un marqueur spécifique pour chaque composé étudié.

- Marqueurs d'analyse

Ces marqueurs sont utilisés pour vérifier le bon fonctionnement de la chaîne analytique. Un ou plusieurs marqueurs peuvent être employés selon les besoins. Ces derniers sont ajoutés avant l'analyse.

Le nombre de marqueurs utilisés est généralement inférieur à celui des composés quantifiés en raison de la non-disponibilité d'homologues marqués isotopiquement pour l'ensemble des composés suivis. À titre d'exemple, la norme XP X43-126 liste 3 marqueurs de prélèvement, 2 marqueurs d'analyse et 33 marqueurs d'extraction pour 49 PFAS analysés.

Il est important de souligner que les marqueurs choisis ne doivent pas interférer avec les paramètres de quantification des composés suivis dans la méthode analytique.

5.2.2. Techniques analytiques

Les techniques d'analyse diffèrent selon les propriétés physicochimiques des PFAS, principalement leur polarité et leur volatilité. Les PFAS polaires sont plutôt analysés par LC-MS/MS (Chromatographie Liquide couplée à la spectrométrie de masse) et les composés apolaires, plus volatils, tels que les FTOHs, peuvent être analysés en GC-MS ou GC-MS/MS (Chromatographie Gazeuse couplée à la spectrométrie de masse). Pour une technique analytique donnée, le choix des paramètres analytiques comme les colonnes et les conditions chromatographiques diffèrent également en fonction de la polarité, de la volatilité et de la longueur des chaînes carbonées des composés analysés.

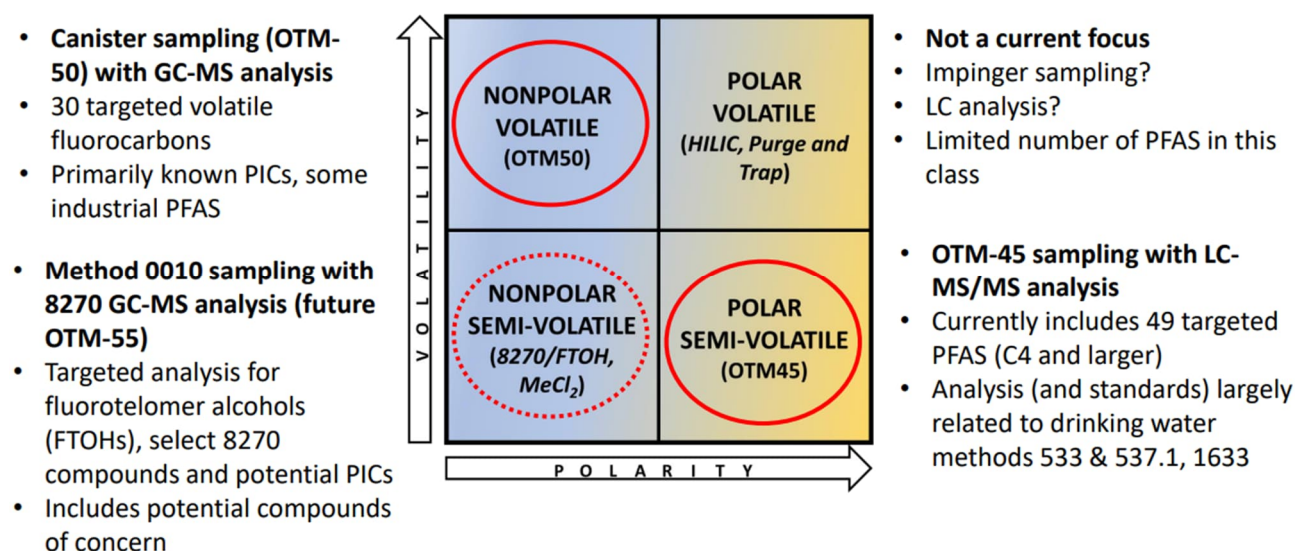


Figure 2: Classification des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des PFAS dans l'air, avec les méthodes d'analyse⁶

Des analyses non ciblées des PFAS peuvent être réalisées par spectrométries de masse à haute résolution : LC-HRMS et/ou GC/HRMS. L'analyse en mode suspect permet l'identification des PFAS en présence à partir de bases de données contenant des centaines de PFAS. D'autres méthodes d'analyse de PFAS existent par approche indiciaire telles que la méthode AOF (Adsorbable Organic Fluorine, pour fluor organique adsorbable) et la méthode TOP (Total Oxidizable Precursors, pour précurseurs oxydables totaux). L'Ineris a publié un rapport en 2025 sur la comparaison des méthodes ciblées et des méthodes indiciaires.³⁷

6. Synthèse

Les PFAS constituent une famille vaste et complexe de plusieurs milliers de composés aux propriétés physico-chimiques variées, dont la surveillance dans l'atmosphère représente un enjeu majeur de santé publique et environnementale. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés avec la mise en place de normes pour certains PFAS semi-volatils polaires (XP X43-126) pour l'air à l'émission de sites industriels, d'importantes lacunes subsistent, notamment pour l'analyse des FTOH et d'autres PFAS semi-volatils non polaires qui peuvent pourtant représenter jusqu'à 80 % des PFAS présents dans l'air ambiant. L'absence actuelle de méthodes normalisées pour les retombées atmosphériques et de valeurs de gestion limite la comparabilité des données et l'évaluation précise des risques sanitaires liés à l'exposition par inhalation et ingestion indirecte. Les travaux de normalisation en cours au niveau français (AFNOR) et européen (CEN), initiés en 2025, sont donc essentiels pour harmoniser les pratiques de prélèvement et d'analyse, permettre une surveillance environnementale efficace autour des installations classées et mieux appréhender l'exposition globale de la population à ces substances persistantes et bioaccumulables. En attendant la disponibilité de ces méthodes standardisées, les laboratoires peuvent s'appuyer sur cette fiche et sur des protocoles issus de la littérature scientifique tout en respectant des précautions strictes pour éviter toute contamination lors des prélèvements et analyses.

7. Références

- ¹ Ineris. Portail Substances Chimiques : PFAS. (<https://substances.ineris.fr/famille-chimique/pfas>) – Consulté en 2025
- ² OECD (2021), Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, OECD Series on Risk Management, No. 61, OECD Publishing, Paris.
- ³ EFSA (2020) - Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food - [Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food - 2020 - EFSA Journal - Wiley Online Library](#)
- ⁴ Santé Publique France (2021) – Projet Esteban : Une étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition - [Esteban](#)
- ⁵ ECHA (2023) - Annex to the Annex XV Restriction report Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). 22.03.2023 - <https://echa.europa.eu/documents/10162/bc038c71-da3e-91a8-68c1-f52f8f0974dd>
- ⁶ S.R. Jackson Using EPA's Stationary Source Measurement Methods for PFAS Air Emissions. NEWMOA PFAS. Analytical Developments Webinar September 25th, 2024
- ⁷ AFNOR (2024) - XP X43-126 - Emissions de sources fixes - Prélèvement et analyse de composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS) semi-volatils polaires | décembre 2024
- ⁸ US EPA (2025). Other Test Method 45 (OTM-45, Revision 1): Measurement of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances from Stationary Sources. U.S. Environmental Protection Agency.
- ⁹ US EPA (2025). Other Test Method 50 (OTM-50, Revision 0): Sampling and Analysis of Volatile Fluorinated Compounds from Stationary Sources Using Passivated Stainless-Steel Canisters.
- ¹⁰ Arp et al. (2024) - The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA), Environmental Science & Technology, 58, issue 45.
- ¹¹ Wallace et al. (2024) - A review of sample collection and analytical methods for detecting per- and polyfluoroalkyl substances in indoor and outdoor air, Chemosphere, 358.
- ¹² Ahrens et al. (2012) – Improved Characterization of Gas–Particle Partitioning for Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Atmosphere Using Annular Diffusion Denuder Samplers.” Environmental Science & Technology 46 (13):7199-7206. <https://doi.org/10.1021/es300898s>.
- ¹³ Wallace et al. (2024) - A review of sample collection and analytical methods for detecting per- and polyfluoroalkyl substances in indoor and outdoor air, Chemosphere, 358.
- ¹⁴ Ineris (2025) - Etat des lieux des usages des PFAS et alternatives documentées, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 209433 - v1.0, 19/09/2025. [Etat des lieux des usages des PFAS et alternatives documentées | Ineris](#)
- ¹⁵ UE (2019) - Règlement (UE) 2019/1021 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants - [Règlement - 2019/1021 - EN - EUR-Lex](#)
- ¹⁶ Convention de Stockholm (2025) - Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) - [Text of the Convention](#)
- ¹⁷ Anses. (2025). Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'élaboration de VTR long terme pour plusieurs perfluorés. Saisine 2022-SA-0198. Maisons-Alfort : Anses, 41 p.
- ¹⁸ Gouvernement flamand (2024) - Nouvelles valeurs de test pour les PFAS dans l'air et le dépôt - <https://www.vlaanderen.be/pfas-vervuiling/nieuwe-toetsingswaarden-voor-pfas-in-de-lucht-en-depositie>
- ¹⁹ ANSES. (2025), [Avis et rapports relatifs au bilan de la contamination des différents milieux, et à la priorisation des composés per- et polyfluoroalkylés \(PFAS\) en vue de mesures de gestion](#). Saisine n°2022-SA-0198. Maisons-Alfort : Anses, 694 p.
- ²⁰ Ineris (2025) - Identification des principales voies d'exposition aux PFAS, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 229253 - v2.0, 08/04/2025. <https://www.ineris.fr/fr/identification-principales-voies-exposition-pfas>
- ²¹ ITRC (The Interstate Technology & Regulatory Council) (2023), Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), September 2023. https://pfas-1.itrcweb.org/6-media-specific-occurrence/#6_1
- ²² Seo SH, Son MH, Shin ES, Choi SD, Chang YS, Matrix-specific distribution and compositional profiles of perfluoroalkyl substances (PFASs) in multimedia environments, Journal of Hazardous Materials, 364, 19-27, 2019
- ²³ Wallington et al. (2006) - Formation of C7F15COOH (PFOA) and Other Perfluorocarboxylic Acids during the Atmospheric Oxidation of 8:2 Fluorotelomer Alcohol, Environmental Science and Technology, 40, 924–930, 2006

-
- ²⁴ AFNOR (2005) - NF EN 14662-1 - Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage des concentrations en benzène - Partie 1 : échantillonnage par pompage suivi d'une désorption thermique et d'une méthode chromatographie en phase gazeuse. Novembre 2005
- ²⁵ AFNOR (2005) - NF EN 14662-2 - Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène - Partie 2 : prélèvement par pompage suivi d'une désorption au solvant et d'une méthode de chromatographie en phase gazeuse. Novembre 2005
- ²⁶ LCSQA, 2014 – Guide méthodologique pour la surveillance du benzène dans l'air ambiant – https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/lcsqa-guide_methodologique_benzene-2015_vf.pdf
- ²⁷ Faust (2023) - PFAS on atmospheric aerosol particles: a review *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2023,25, 133-150
- ²⁸ Li et al (2024) - Occurrence and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Atmosphere: Size-Dependent Gas-Particle Partitioning, Precipitation Scavenging, and Amplification *Environmental Science & Technology* Vol 58/Issue 21 May 2024
- ²⁹ Wu et al, 2021 *Chemosphere* Volume 280, October 2021, 130607 Simultaneous analysis of neutral and ionizable per- and polyfluoroalkyl substances in air . <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130607>
- ³⁰ DIN 38407-53, 2025, German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge - Jointly determinable substances (group F) - Part 53: Determination of Trifluoroacetic acid (TFA) in water - Method using liquid chromatography and mass spectrometric detection (LC-MS/MS) after direct injection (F 53)
- ³¹ S. Bristeau - Composés Perfluorés (PFAS) à chaîne courte et ultracourte TFA, PFPrA, PFBA, TFMSA, PFEtS, PFPrS et TFSH Méthode d'analyse dans les eaux - fraction dissoute – Rapport Aquaref MA-90.1 – 14 p
- ³² AFNOR (2005) - NF EN 14662-4 - Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage des concentrations en benzène - Partie 4 : échantillonnage par diffusion suivi d'une désorption thermique et d'une chromatographie en phase gazeuse. Novembre 2005
- ³³ AFNOR (2005) - NF EN 14662-5 - Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration de benzène - Partie 5 : prélèvement par diffusion suivi d'une désorption au solvant et d'une chromatographie gazeuse. Novembre 2005
- ³⁴ LCSQA, 2020 – Guide de validation des données de mesures à analyse différée - https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2019_Guide_Validation_donnees_mesures_differees.pdf
- ³⁵ VITO. (2023). Determination of the concentration of per- and polyfluoroalkyl compounds (PFAS) in a guided gas stream
- ³⁶ AFNOR (2024) - NF EN 17892 - Qualité de l'eau - Détermination de substances per- et polyfluoroalkylées sélectionnées dans l'eau potable - Méthode par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) | Juin 2024
- ³⁷ Nina Huynh, Anne Togola, Yann Aminot, Jean-Philippe Ghestem, Hugues BiauDET – Analyse de PFAS : comparaison de méthodes ciblées et indiciaires – Rapport AQUAREF 2025– 29 p.