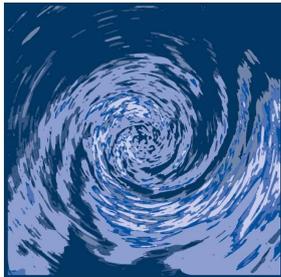


ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE PFAS DANS LES EAUX USEES

Marché MP 24.011



SPGE

**Société Publique
de Gestion de l'Eau**

Rapport d'étude

Résumé

Les substances per- et polyfluoroalkylées, les PFAS, sont des composés organofluorés synthétiques comportant un ou plusieurs groupes fonctionnels alkyle per- ou polyfluorés. Les PFAS sont une **large famille de plus de 5000 composés chimiques**. Leurs propriétés hydrophobe et lipophile ont encouragé leur fabrication puis leur utilisation depuis les années 1950 dans divers domaines industriels et produits de consommation courante. Ils sont qualifiés de « **polluants éternels** » ou de « Forever Chemical » en raison de la stabilité de la liaison C-F dont ils sont dotés. Ce sont des substances non dégradées dans l'environnement, persistantes, mobiles et bioaccumulables et qui **se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement**.

La contamination des eaux et sols par les PFAS est quasiment généralisée avec des concentrations très variables selon les caractéristiques du bassin de population et des activités économiques.

Les **PFAS peuvent entraîner des problèmes de santé** tels que des lésions hépatiques, des maladies thyroïdiennes, de l'obésité, des problèmes de fertilité et des cancers. C'est pourquoi leur usage est de plus en plus restreint voire interdit par des réglementations internationales, trans-nationales et nationales. Plusieurs directives européennes entreront en vigueur en 2026 afin de limiter très fortement l'usage des PFAS.

En Belgique, la gestion de la contamination de l'eau potable par les PFAS autour de la base militaire de Chièvres en Wallonie a été à l'origine d'un scandale politique en novembre 2023.

Des scandales similaires ont vu le jour dans d'autres pays du monde en Europe, aux Etats unis et en Australie. Afin d'apporter une réponse à ce problème, les autorités de ces pays ont dû mettre en œuvre un renforcement progressif des restrictions d'usages de PFAS, adopter des stratégies nationales de lutte contre les PFAS et améliorer les connaissances scientifiques sur les propriétés, les sources ou les voies de transfert des PFAS.

Ces actions ont permis d'identifier que les stations d'épurations sont l'une des principales voies de transfert des PFAS dans l'environnement, et de définir des valeurs maximales d'exposition pour l'homme et l'environnement.

La Wallonie souhaite se doter d'une stratégie de lutte contre les PFAS issus des systèmes d'assainissement. Une analyse des pratiques des autres pays a été faite afin de mieux connaître l'ampleur du problème, de contenir la dispersion des PFAS dans l'environnement, d'étudier les voies de traitements possibles au sein des stations d'épuration et de mettre en place un programme de surveillance

<i>Rédaction</i>		
	<i>Nom</i>	<i>Organisme</i>
<i>Relecteur</i>	<i>Nicolas Jeanmaire</i>	<i>OiEau</i>
<i>Rédacteur</i>	<i>Benoît Fribourg-Blanc</i>	<i>OiEau</i>
<i>Relectrice</i>	<i>Sandrine Parotin</i>	<i>CTE Lim</i>
<i>Rédactrice</i>	<i>Maya Aimeur</i>	<i>CTE Lim</i>
<i>Rédacteur</i>	<i>Nicolas Dhuygelaere</i>	<i>Data Lime</i>
<i>Relecteur</i>	<i>Christian Didy</i>	<i>SPGE</i>
<i>Contributeur</i>	<i>Rosalie Pype</i>	<i>SPGE</i>

SOMMAIRE

1. Contexte	14
1.1. Situation de l'assainissement en Wallonie	15
1.2. Les PFAS	17
1.2.1 Nature Chimique des PFAS	17
1.2.2 Effets sur la santé et voies d'exposition	21
1.3. Contamination aux PFAS en Belgique	23
1.3.1 Flandre	24
1.3.2 Wallonie	25
2. Exigences réglementaires, normes et recommandations	33
2.1. Niveau international	33
2.2. Niveau européen	34
2.2.1 Le Règlement Polluants Organiques Persistants	34
2.2.2 Le règlement REACH 1907/2006	34
2.2.3 Gaz fluorés	35
2.2.4 La Directive "Pesticides"	35
2.2.5 La Directive sur les eaux destinées à la consommation humaine - EDCH	36
2.2.6 Directive « Emballage » et règlement sur les matériaux en contact avec les aliments	36
2.2.7 Directive sur les substances prioritaires	37
2.2.8 Directive ERU	38
2.2.9 Directive Boues - SSD	39
2.2.10 Règlement 2019/1010 communication environnement	39
2.3. Belgique	40
2.3.1 Bruxelles	40
2.3.2 Flandre	41
2.3.3 Wallonie	49
2.4. Pays européens	50
2.4.1 Allemagne	50
2.4.2 Autriche	51
2.4.3 Danemark	52
2.4.4 France	52
2.4.5 Norvège	55
2.4.6 Suède	55
2.4.7 Pays Bas	56
2.4.8 Suisse	56
2.5. Pays anglo-saxons	56
2.5.1 Royaume Uni	56
2.5.2 Etats-Unis	57
2.5.3 Canada	61
2.5.4 Australie	62
2.6. Pays asiatiques	66
2.6.1 Japon	66
2.6.2 Corée du Sud	66
2.7. Synthèse	66

3. Sources d'émission	70
3.1. Utilisations des PFAS	70
3.2. Sources d'émission	71
3.2.1 Les sites industriels	71
3.2.2 Les sites d'utilisation des mousses extinctrices.....	73
3.2.3 Les aéroports, aérodromes et ateliers de maintenance aéronautique.....	73
3.2.4 Les sites de gestion des déchets	74
3.2.5 Les abattoirs	74
3.2.6 Les établissements de santé.....	74
3.2.7 Les émissions diffuses	74
4. Comportements des PFAS dans l'environnement et dans les stations d'épuration	76
4.1. Dans l'environnement.....	76
4.2. Le cas des stations d'épuration urbaines	77
4.2.1 Compartiment eau.....	78
4.2.2 Compartiment boues.....	79
5. Analyse et suivi des PFAS dans les matrices aqueuses et solides	81
5.1. Le prélèvement et la conservation des échantillons.....	81
5.1.1 Prélèvement et conservation des échantillons des eaux usées	81
5.1.2 Prélèvement et conservation des échantillons dans les sols et les boues.....	83
5.2. Les modalités et fréquences de prélèvement	84
5.2.1 Les modalités et fréquences de prélèvement des échantillons aqueux	84
5.2.2 Les modalités et fréquences de prélèvement des échantillons de boues et de sols..	85
5.3. Les méthodes d'échantillonnages adoptées dans différentes études.....	86
5.4. La préparation des échantillons.....	88
5.5. Les techniques d'analyses des PFAS dans les eaux usées et les boues	89
5.5.1 Analyse des PFAS par chromatographie liquide ou gaz couplé à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS ou GC-MS/MS).....	89
5.5.2 Analyse des PFAS via l'analyse du Fluor organique global	91
5.5.3 Analyse des PFAS via une oxydation forcée (TOP)	91
5.5.4 Détection des PFAS par différents capteurs	92
6. Mise en œuvre de campagnes de suivi des PFAS dans les eaux usées et les boues de stations d'épuration	94
6.1. Définition des sites cibles	95
6.2. Quelles molécules suivre ?.....	97
6.3. Mode d'échantillonnage	98
6.4. Méthodes d'échantillonnage.....	100
6.5. Définition des seuils de significativité	101
6.6. Plan d'actions en cas de significativité.....	104
7. Possibilités de traitement	106
7.1. Traitement de l'eau	106
7.2. Traitement des boues.....	107
7.3. Traitement des sols.....	108
8. Conclusions.....	110

9. Bibliographie et webographie:	117
10. Annexes:	125
10.1. Annexe 1 : Principaux PFAS.....	125
10.2. Annexe 2 : Stations d'épuration rapportées au titre de la Directive sur les Eaux Résiduaires Urbaine en 2022	137
10.3. Annexe 3 : Identification des laboratoires d'analyses des PFAS en France et en Suisse	145
10.3.1 Les laboratoires d'analyse privés en France	145
10.3.2 Les laboratoires d'analyse privés en Suisse	152
10.4. Les laboratoires de recherche.....	155
10.4.1 Les laboratoires de recherche en France.....	155
10.4.2 Les laboratoires de recherche en Suisse.....	156

Liste des équations

Équation 1 : charge polluante (CPL) provoquée par un rejet ponctuel en Allemagne 102

Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation des stations d'épuration rapportées en 2022 au titre de la DERU.....	15
Figure 2: Gestion des boues de stations d'épuration collectives (STEP) en Wallonie	16
Figure 3: Classification des PFAS selon l'OCDE[3]	17
Figure 4: Classification des PFAS non polymères[6]	18
Figure 5: Effets des PFAS sur la santé humaine [14].....	22
Figure 6: Carte "Forever pollution project" zoomée sur la Belgique.....	23
Figure 7: Sites de risque PFAS. Les sites sont délimités par un code couleur (rouge, jaune et vert) en fonction de l'état et des résultats de la recherche sur les sols [17]	24
Figure 8 : Somme des 28 PFAS en sortie des stations d'épuration.....	28
Figure 9 : Somme des 27 PFAS dans les boues des stations d'épuration	31
Figure 10 : Nombre de terrain avec pollution en Wallonie [8]	32
Figure 11 : Evaluation du risque d'exposition en fonction de la toxicité des 25 PFAS suivi dans l'état de Hawaii [72]	61
Figure 12 : Dispersion des PFAS dans l'environnement [81]	76
Figure 13: Technologies des traitements des lixiviats issues du lavage des sols.....	108
Figure 14 : Technologie de lavage in-situ des sols via des Biopolymères protéiniques en circuit avec une régénération des réactifs de lavage par séparation des PFAS	109

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des abréviations	10
Tableau 2: Liste des principaux PFAS	13
Tableau 3 : Principaux PFAS classés par famille et longueur de la chaîne carbonée[4]	19
Tableau 4: Liste des PFAS suivis dans l'« Audit »	25
Tableau 5 : PFAS suivis et détectés dans les EAUX USÉES ÉPURÉES en sortie des stations d'épuration lors de l'« Audit » (444 échantillons)	26
Tableau 6 : PFAS suivis et détectés dans les BOUES des stations d'épuration lors de l'« Audit » (112 échantillons).....	29
Tableau 7 : PFAS suivis et détectés dans les BOUES des stations d'épuration valorisées en agriculture lors de l'« Audit ».....	30
Tableau 8 : Liste des 20 PFAS de l'annexe I de la directive EDCH.....	36
Tableau 9 : Liste des RPF proposés pour la révision de la directive NQE	38
Tableau 10 : valeurs d'essai pour les sols contenant des PFAS - Flandres	43
Tableau 11 : Liste des PFAS quantifiables dans les sols et les sédiments - Flandre.....	44
Tableau 12 : Liste des 6 PFAS indicateurs dans les sols et les sédiments - Flandre.....	45
Tableau 13 : Liste des 26 PFAS quantifiables dans les déchets organiques (dont les boues) - Flandre.....	46

Tableau 14 : Liste des 16 PFAS indicateurs dans les déchets organiques (dont les boues) - Flandre.....	47
Tableau 15 : Liste des PFAS du WAC/IV/A/026.....	47
Tableau 16: Liste des PFAS du WAC/IV/A/025.....	48
Tableau 17 : valeurs de « non-signifiante » dans les eaux souterraines - Allemagne.....	51
Tableau 18 : Liste des substances à suivre de l'arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation.....	54
Tableau 19 : Liste complémentaire des substances de l'arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation	54
Tableau 20 : Valeurs limites en PFAS dans l'eau potable aux Etats Unis [69]	57
Tableau 21: Valeurs limites en PFAS dans l'eau potable aux Etats Unis [69]	60
Tableau 22 : Valeurs préliminaires dans l'eau potable au Canada	61
Tableau 23 : Valeurs préliminaires dans l'eau potable et les eaux de baignade en Australie	63
Tableau 24 : Valeurs guides australiennes pour les eaux de surfaces.....	63
Tableau 25 : Valeurs guides australiennes pour le biote	64
Tableau 26 : Valeurs guides australiennes pour les boues	64
Tableau 27 : Valeurs guides australiennes pour les sols.....	65
Tableau 28 : Valeurs guides australiennes pour l'exposition humaine par les sols.....	65
Tableau 29 : Seuils d'alerte dans les boues dans l'état du Queensland	66
Tableau 30 : Seuils d'interdiction de valorisation agricole des boues.....	68
Tableau 31 : Seuils d'alerte pour les PFAS des boues	68
Tableau 32 : Emission européennes de PFAS par secteur en 2023 [83].....	71
Tableau 33: Séparation hypothétique du panache des eaux souterraines des PFAS basée sur les coefficients de sorption des composés individuels [73].....	77
Tableau 34 : Les types de matériaux recommandés et à éviter dans le cadre de la réalisation d'échantillonnage d'eaux usées [97]	81
Tableau 35 : Résumé du processus analytique pour l'analyse des PFAS présents dans différentes matrices d'eau [101]	89
Tableau 36 : Résumé du processus analytique pour l'analyse des PFAS présents dans différents types de sols et de sédiments [101]	90
Tableau 37 : Récapitulatif des techniques analytiques des PFAS avec leurs avantages et inconvénients.....	92
Tableau 38 : Liste des molécules à suivre	97
Tableau 39: Récapitulatifs des techniques de traitement des PFAS dans l'eau [116].....	106
Tableau 40 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire IANESCO en France avec leur LQ	145
Tableau 41 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire CARSO-CAE avec leur LQ et le coût analytique	148
Tableau 42 : Liste des 26 PFAS analysés dans les boues par le laboratoire WESSLING avec leur LQ.....	150
Tableau 43 : Récapitulatif des coûts analytiques des quatre laboratoires consultés en France	152
Tableau 44 : Liste des PFAS analysés par Eurofins -Suisse avec leur LQ	152

Tableau 45 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire Bachema avec leur LQ et les coûts par pack en CHF 154

Tableau 1: Liste des abréviations

Sigle	Libellé
µg/L	Microgramme par litre
AFFF	Agent formant un film flottant
AFNOR	Association française de normalisation
AOF	Adsorption du fluor organique
Aquaref	Laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques
AR-AFFF	AFFF résistants à l'alcool
AR-FFFP	FFFP résistants à l'alcool
AR-FP	FP résistants à l'alcool
BAG	Office fédéral de la santé publique de Suisse
CAS	Chemical Abstracts Service
CHF	Franc Suisse
CIC	Chromatographie ionique
CIP	Chemical Investigations Programme
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
CMA	Concentration maximale admissible (voir NQE)
COFRAC	Comité français d'accréditation
CTE Lim	Centre Technique de la Filière de l'Eau de Limoges
Cx	Chaîne moléculaire contenant x atome de carbone
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DERU	Directive sur les Eaux Résiduaire Urbaines
DIN	Institut allemand de normalisation
DWI	Drink Water Inspectorate
EAWAG	Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau
ECHA	Agence européenne des produits chimiques
ECOS	Environmental Council of the States
EDCH	Eaux destinées à la consommation humaine
EH	Equivalent habitant
EOF	Extractible Organo Fluorine
EPI	Equipements de protection individuelle
F-C	Forever Chemical
FFFP	Agent formant un film flottant protéinique
FP	Fluoropolymères
GC-MS/MS	Chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse
HFO	Hydrofluoroléfine
HPLC	High pressure liquid chromatography
ICPE	Installations classées pour la protection de l'environnement

ISO	Organisation internationale de normalisation
LC	Chromatographie liquide
LC-MS/MS	Chromatographie en phase liquide-spectrométrie de masse
LoD/LD	Limite de détection
LoQ/LQ	Limites de quantification
MA	Moyenne annuelle (voir NQE)
MCL	Maximum contaminant level
MES	Matière en suspension
mg/kg	Milligramme par kilogramme
mg/L	Milligramme par litre
MS	Matière sèche
NEMP	National Environmental Management Plan
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
ng/L	Nanogramme par litre
NPDWR	National Primary Drinking Water Regulations
NQE	Norme de qualité environnementale
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OiEau	Office International de l'Eau
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PFAA	perfluoroalkylés acides
PFAS	Substances per- et polyfluoroalkylées
PFAS 4	Somme PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS
PFAS 12	La somme de 12 PFAS : PFBS, PFHxS, PFOS, PFOSA, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA utilisée au Danemark
PFAS 20	Somme des 20 PFAS de la directive EDCH
PFAS 24	Somme des 24 PFAS de la future DCE-NQE pondérée par les RPF de chaque substance.
PFCA	perfluoroalkylés acides carboxyliques
PFSA	perfluoroalkylés acides sulfoniques
pH	Potentiel Hydrogène
pKa	Constante d'équilibre
POP	Polluants organiques persistants
ppb	Partie par billion
ppm	Partie par million
ppt	Partie par trillion
PVC	Polychlorure de vinyle
RPF	Relative Potency Factor

Reach	Enregistrement, évaluation et autorisation des produits chimiques
RSDE	Rejets/Réduction de Substances Dangereuses dans l'Eau
SAS	Service d'accréditation suisse
SPE	Cartouche d'extraction en phase solide
SPGE	Société publique de gestion de l'eau
STEP	Station d'épuration
STEU	Station de traitement des eaux usées urbaines
STOWA	Fondation pour la recherche appliquée sur l'eau
SVHC	Substances of very high concern
TOP	Total Oxidisable Precursors
UE/EEE	Union Européenne/Espace économique européen
UHPLC	Ultra-high performance chromatography
UPLC	Ultra-performance liquid chromatography
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

Tableau 2: Liste des principaux PFAS

MOLECULE	NOM COMPLET	CAS
PFBA	Acide perfluorobutanoïque	375-22-4
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	2706-90-3
PFBS	Acide perfluorobutane sulfonique	59933-66-3
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque	307-24-4
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque	375-85-9
PFHxS	Acide perfluorohexane sulfonique	3871-99-6
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	335-67-1
PFNA	Acide perfluorononanoïque	375-95-1
PFOS	Acide perfluorooctane sulfonique	2795-39-3
PFDA	Acide perfluorodécanoïque	335-76-2
PFDoDA	Acide perfluorododécanoïque	307-55-1
PFHpS	Acide perfluoroheptane sulfonique	375-92-8
PFTTrDA	Acide perfluorotridecanoïque	72629-94-8
PFUnDA	Acide perfluoroundécanoïque	2058-94-8
PFUDS	Acide perfluoroundécane sulfonique	441296-91-9
PFTTrDS	Acide perfluorotridecane sulfonique	174675-49-1
PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	474511-07-4
PFDS	Acide perfluorodécane sulfonique	335-77-3
PFPeS	Acide perfluoropentane sulfonique	2706-91-4
PFDoS	Acide perfluorododécane sulfonique	79780-39-5
PFTTeDA	Acide perfluorotétradécanoïque	376-06-7
PFHxDA	Acide perfluorohexadécanoïque	67905-19-5
PFODA	Acide perfluorooctadécanoïque	16517-11-6
ADONA	Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	9190005-14-4
C604	Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid	1190931-27-1
GenX	Acide 2,3,3,3-tétrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy) propanoïque	13252-13-6
6:2-FTOH	2-perfluorohexyl ethanol (6:2)	647-42-7
8:2-FTOH	2-perfluorooctyle ethanol (8:2)	678-39-7
PFOSA	Perfluorooctane sulfonamide	754-91-6
6:2 FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique	27619-97-2
8:2 FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorodécane sulfonique	27619-96-1
8:2 diPAP	Bis[2-(perfluorooctyl)ethyl] phosphate	678-41-1
TFA	Acide trifluoroacétique	76-05-1

Une liste plus étendue de PFAS avec leurs principales caractéristiques est disponible en Annexe 1

1. Contexte

Le sujet des PFAS est apparu sur la place publique à la suite de la sortie du film « Dark Waters » en 2019. Le film relate le scandale sanitaire lié à la pollution des eaux par le PFOA qui a eu lieu autour d'un site de DuPont dans l'État de Virginie, aux États-Unis, dans les années 80-90. Depuis, plusieurs actions collectives menées aux États-Unis ont forcé de nombreux industriels, dont 3M, Chemours, DuPont et Corteva, à conclure des accords à plusieurs milliards de dollars visant à indemniser les victimes, financer la dépollution des sites et mettre fin aux poursuites. Plusieurs affaires ont également été relayées par les médias à travers l'Europe tels que les cas de la vallée de la chimie, au sud de Lyon en France, mettant en cause les groupes Arkema et Daikin ou encore l'usine chimique de Mitenu à Veneto en Italie, les rejets d'un centre de formation à la lutte contre les incendies à Korsør au Danemark, les rejets liés aux mousses anti-incendie d'un aéroport militaire à Ronneby en Suède ou l'usine DuPont/Chemours à Dordrecht aux Pays Bas.

En Belgique, la gestion de la contamination de l'eau potable par les PFAS autour de la base militaire de Chièvres en Wallonie a été à l'origine d'un scandale politique en novembre 2023. Le groupe 3M a également conclu en juillet 2022 un accord avec les autorités régionales de Flandre prévoyant 571 millions d'euros pour assainir les sols et contrôler une éventuelle pollution de l'air autour de son usine de Zwijndrecht (nord). Le gouvernement néerlandais a de son côté annoncé en mai 2023 tenir 3M pour « responsable » des dommages causés par des PFAS rejetés par cette même usine dans l'Escaut occidental.

Ces affaires ont poussé à mettre en œuvre un renforcement progressif des restrictions d'usage des PFAS, notamment au travers de l'adoption de stratégies nationales PFAS dans plusieurs pays, ou de l'amélioration des connaissances scientifiques sur les propriétés, les sources ou les voies de transfert des PFAS. Ces actions ont permis de définir des valeurs maximales d'exposition pour l'homme et l'environnement.

En tant que lieu de convergence des effluents aqueux d'un bassin de population, les stations d'épuration ont été identifiées comme l'une des principales voies de transfert de PFAS dans l'environnement. En effet, les études ont montré que les PFAS étaient très régulièrement trouvés en concentrations variables en sortie de station d'épuration et dans les boues. De plus, les traitements actuellement en place dans les stations d'épuration sont relativement inefficaces contre les PFAS.

La Wallonie, au même titre que la majorité des pays européens, ne disposant pas encore d'un cadre légal de lutte contre les PFAS issus des systèmes d'assainissement, a décidé de mettre en place un programme de surveillance afin de mieux connaître l'ampleur du problème, de contenir la dispersion des PFAS dans l'environnement et d'étudier les voies de traitements possibles au sein des stations d'épuration.

La SPGE a pour ce faire missionné l'Office International de l'eau afin de réaliser une étude bibliographique sur les PFAS présents dans les eaux et les boues des stations d'épuration dans le but de déterminer comment est appréhendé ce problème à travers les autres pays. Ainsi, cette synthèse bibliographique a pour objectifs de :

- Repositionner le contexte de l'étude,
- Inventorier les contours réglementaires aux niveaux nationaux, européens et internationaux,

- Déterminer les sources d'émission des PFAS et leurs mécanismes de transfert dans les matrices environnementales,
- Identifier les bonnes pratiques et les méthodologies pour la mise en place de campagnes d'échantillonnage et d'analyse des PFAS,
- Mettre en évidence les traitements disponibles pour le traitement des PFAS présents dans les rejets aqueux et les boues des stations d'épuration et les sols.

1.1. Situation de l'assainissement en Wallonie

Selon le rapportage 2022 au titre de la Directive sur les Eaux Résiduaire Urbaines - DERU - La Wallonie comptait **173 agglomérations d'assainissement** de plus de 2000 équivalents habitant -EH - en 2020. Ces agglomérations ont généré une **charge totale de 3 063 400 EH**. 99,6 % de la charge a été collectée par un réseau d'assainissement (le plus souvent unitaire) puis traitée dans l'une des 203 stations d'épurations actives que compte la région (voir la carte ci-dessous).

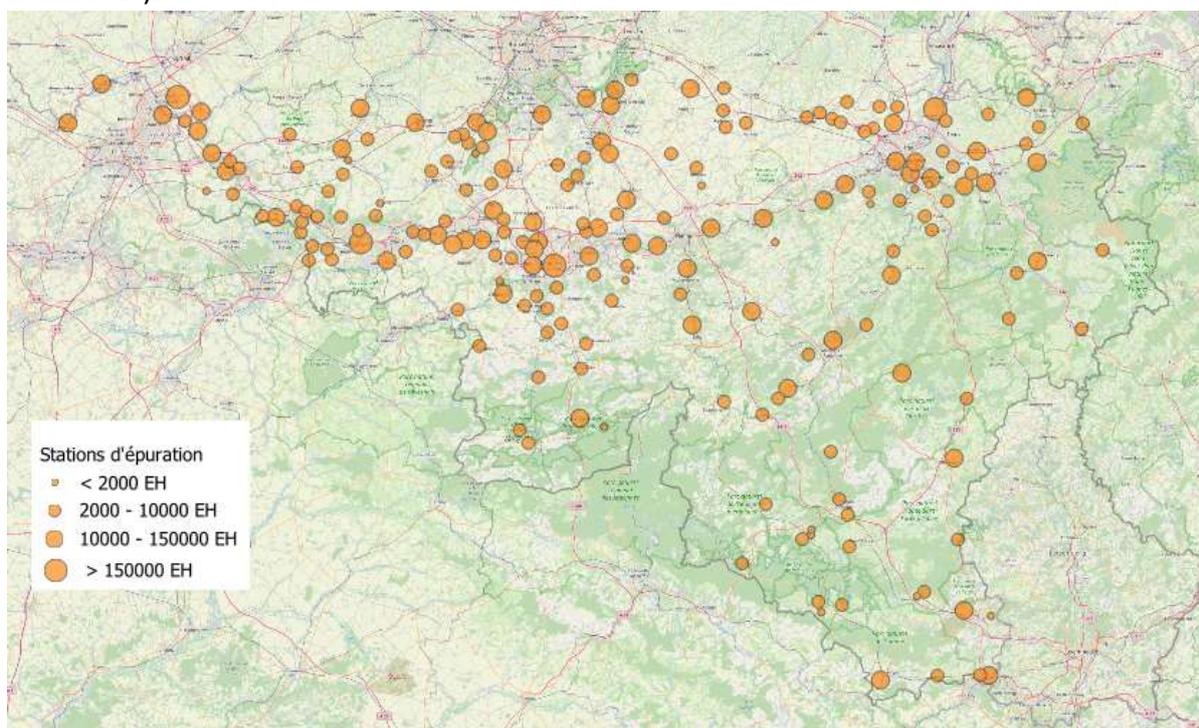


Figure 1: Carte de localisation des stations d'épuration rapportées en 2022 au titre de la DERU

63 stations d'épuration ont une capacité nominale comprise entre 10 000 EH et 150 000 EH (dont 44 avaient une charge entrante effective supérieure à 10 000 EH) et 5 stations ont une capacité nominale supérieure à 150 000 EH.

Les stations d'épuration ayant une capacité nominale supérieure à 10 000 EH traitent environ les 2/3 de la charge produite à l'échelle de la région.

Sur les stations ayant une capacité nominale de plus de 10 000 EH, seule la station de Trivières (BERW5502202) se révèle ponctuellement non conforme en raison de mauvaise performance sur le traitement de l'azote (des travaux d'amélioration sont actuellement en cours).[1].

En 2023, **72 % des boues de STEP produites en Wallonie ont été valorisées en agriculture** et 28 % ont été incinérées. La plupart des boues valorisées en agriculture sont chaulées sauf pour les 1500 tonnes traitées en serres à Wasmuel. Environ 5300 tonnes de boues sont également méthanisées sur 4 sites à Basse Wavre, Mouscron, Marche et Bastogne avant d’être chaulées ou incinérées. Les capacités d’incinération en Wallonie étant insuffisantes, une partie des boues est incinérés en Flandre ou dans les pays voisins. L’enfouissement des boues en décharge a été arrêté en 2007.

Le graphique ci-dessous retrace l’évolution de la destination des boues depuis 1994 :

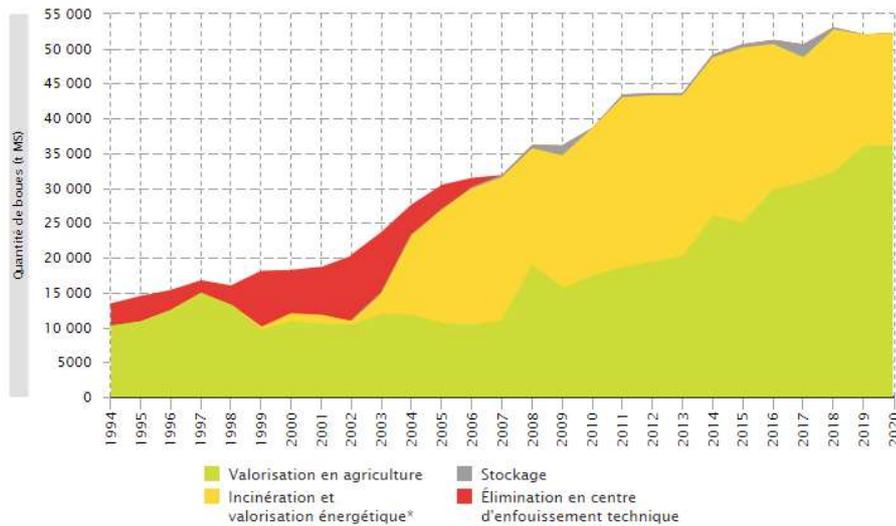


Figure 2: Gestion des boues de stations d’épuration collectives (STEP) en Wallonie

Actuellement, d’après la SPGE, une vingtaine de station d’épuration fait l’objet d’un suivi régulier des micropolluants dans le cadre du suivi relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets (Directive E-PRTR), d’obligations liées aux permis d’exploiter (comme à Amay) ou d’études à des fins de recherche plus ponctuelles.

1.2. Les PFAS

1.2.1 Nature Chimique des PFAS

Les substances per- et polyfluoroalkylées, également connues sous le nom de PFAS (« pifasse ») ou composés perfluorés, sont des composés organofluorés synthétiques comportant un ou plusieurs groupes fonctionnels alkyle per- ou polyfluorés. Les PFAS sont une **large famille de plus de 5000 composés chimiques** [2]. Les PFAS sont caractérisés par une chaîne carbonée dont au moins un carbone est complètement substitué par des atomes de fluor dit groupement perfluoroalkyle[3].

Grâce à leurs propriétés très diverses : tensioactif, antiadhésif, imperméabilisant, lubrifiant, résistant aux fortes chaleurs, les substances PFAS sont largement utilisées depuis les années 1950 dans divers domaines industriels et produits de consommation courante dont les emballages alimentaires. Leurs propriétés chimiques en font aussi des substances non dégradées dans l'environnement, persistantes, très mobiles et bioaccumulables, qualifiées de « polluants éternels » ou de « Forever Chemical » (F-C)[4].

A l'heure actuelle, il n'existe pas de système de catégorisation ou de regroupement unique. La classification la plus commune est celle définie par l'OCDE en 2021 qui propose une classification des différentes familles et opère une première distinction entre les PFAS non-polymères et les PFAS polymères.[5]

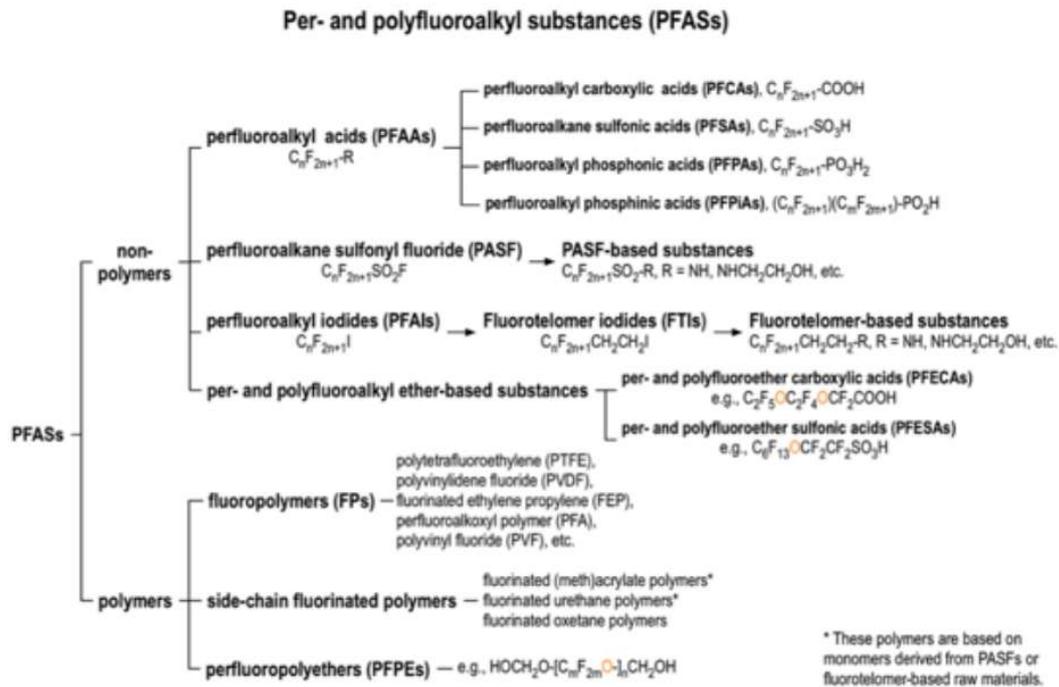


Figure 3: Classification des PFAS selon l'OCDE[3]

La famille des PFAS non-polymères est la plus étudiée et celle pour laquelle, certaines restrictions ont été prises. Les études scientifiques ont montré que les PFAS polymères sont en général moins mobiles dans l'environnement et se dégradent en PFAS non-polymères. Leur suivi est donc assimilable à celui des PFAS non-polymères [4].

Les PFAS non polymériques se divisent en 2 sous-catégories principales : les **perfluoroalkylés** et les **polyfluoroalkylés**. Les 2 autres sous-catégories : les iodures de perfluoroalkyle et les éthers de per/poly-fluoroalkyle, sont moins étudiées et sont moins suivi dans l'environnement.

Néanmoins, ces PFAS, tels que les **polyfluoroalkylés** servent de plus en plus souvent de produit de substitution.

➤ **Les substances perfluoroalkylées**

Les substances perfluoroalkylées sont des molécules pour lesquelles l'ensemble des atomes de carbone, hors groupe fonctionnel, sont reliés à des atomes de fluor : plus précisément, tous les atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de fluor. La chaîne carbonée peut être reliée à un groupe fonctionnel acide (carboxylique, sulfonique, phosphonique), sulfonamide ou aldéhyde attaché à une extrémité qui leur confère un caractère amphiphile et des propriétés tensio-active. Ces composés sont donc très mobiles dans l'environnement et bioaccumulables.

La plus grande famille de perfluoroalkylés est la famille des **perfluoroalkylés acides (PFAA)**. Les PFAA comprennent 2 classes distinctes de substances : **les perfluoroalkylés acides carboxyliques (PFCA)** et **les perfluoroalkylés acides sulfoniques (PFSA)**. La structure chimique des PFCA et des PFSA est identique, la seule différence réside dans le groupe fonctionnel attaché à l'extrémité (carboxylate pour les PFCA et sulfonate pour les PFSA). Les atomes de fluor sont attachés à tous les atomes de carbone sauf un, où se situe le groupe fonctionnel. **L'acide perfluorooctanoïque (PFOA)** et le **sulfonate de perfluorooctane (PFOS)** sont deux substances chimiques appartenant à la famille des PFAA et sont celles de la famille des PFAS les plus utilisées historiquement et les plus étudiées[6].

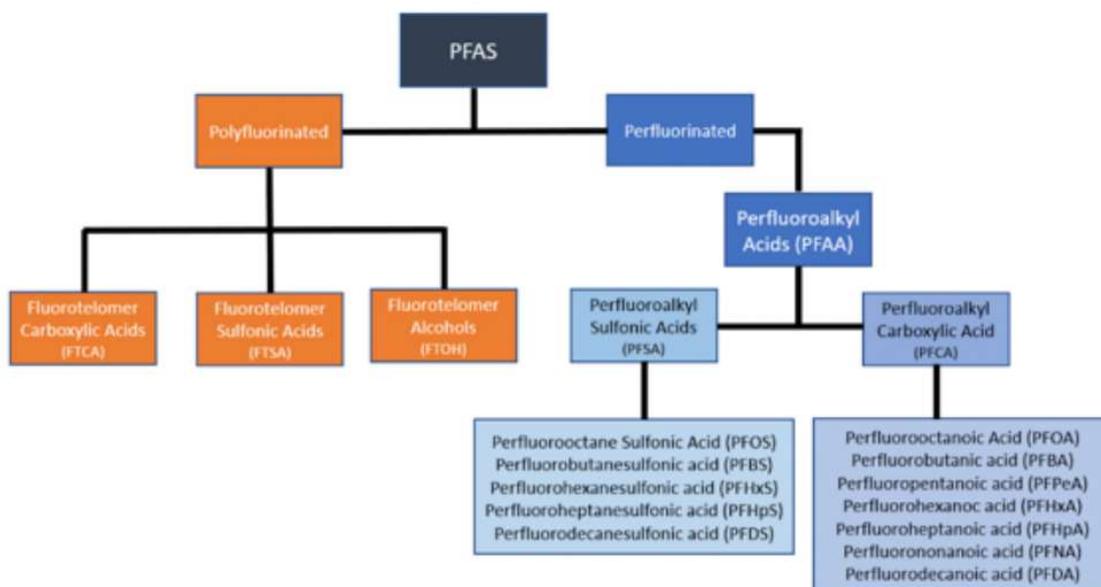


Figure 4: Classification des PFAS non polymères[6]

Au sein du groupe des PFAA, les substances sont également distinguées en fonction de la longueur de leur chaîne de carbone. **Si c'est un PFCA, la chaîne est considérée comme courte jusqu'à 7 atomes. S'il s'agit d'un PFSA, la chaîne est considérée courte jusqu' à 5 atomes.** Les PFAS à chaîne plus courte ont été développés plus récemment pour remplacer ceux à chaîne plus longue du fait des restrictions d'usage [6].

Tableau 3 : Principaux PFAS classés par famille et longueur de la chaîne carbonée[4]

PFAS	Nom complet	Nombre d'atome de carbone
Perfluoroalkylés acides carboxyliques (PFCA)		
PFBA	Acide perfluorobutanoïque	4 (courte)
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	5 (courte)
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque	6 (courte)
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque	7 (courte)
PFOA*	Acide perfluorooctanoïque	8 (longue)
PFNA*	Acide perfluorononanoïque	9 (longue)
PFDA	Acide perfluorodécanoïque	10 (longue)
PFUnA/PFUnDA	Acide perfluoroundécanoïque	11 (longue)
PFDoDA	Acide perfluorododécanoïque	12 (longue)
PFTTrDA	Acide perfluorotridécanoïque	13 (longue)
PFTeDA	Acide perfluorotétracanoïque	14 (longue)
Perfluoroalkylés acides sulfoniques (PFSA)		
PFBS	Sulfonate de perfluorobutane	4 (courte)
PFPeS	Sulfonate de perfluorohexane	5 (courte)
PFHxS	Sulfonate de perfluorohexane	6 (longue)
PFHpS	Sulfonate de perfluoroheptane	7 (longue)
PFOS	Sulfonate de perfluorooctane	8 (longue)
PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	9 (longue)
PFDS	Sulfonate de perfluorodécane	10 (longue)
PFUnS/PFUnDS	Acide perfluoroundécane sulfonique	11 (longue)
PFDoDS	Acide perfluorododécane sulfonique	12 (longue)
PFTTrDS	Acide perfluorotridécane sulfonique	13 (longue)
PFTeDS	perfluorotetradecane sulfonate	14 (longue)

*Le PFOA et le PFNA sont les principaux représentants des PFCA.

*Le PFOS est le principal représentant des PFSA.

➤ Les substances polyfluoroalkylées

Les substances polyfluoroalkylées constitue la deuxième grande catégorie de PFAS non-polymères. Les substances polyfluoroalkylées sont des molécules pour lesquelles au moins un atome de carbone est relié à un atome d'hydrogène. Une caractéristique particulière des PFAS polyfluoroalkylés est leur dégradation. En effet, les PFAS polyfluoroalkylés peuvent se transformer / se dégrader en PFAS perfluoroalkylés, et notamment en acides carboxyliques (**PFCA**) ou en acides sulfoniques (**PFSA**).

➤ **Les Fluoropolymères (FP) :**

Un fluoropolymère est un polymère auquel du fluor est attaché à la majorité des atomes de carbone qui constituent le squelette de la chaîne polymère. Les fluoropolymères courants sont : le polytétrafluoroéthylène (**PTFE**) notamment utilisé pour la production de revêtement antiadhésif dans les ustensiles de cuisine, le polyfluorure de vinylidène (**PVDF**) utilisé pour fabriquer des bandes transporteuses pour l'industrie agro-alimentaire et l'éthylènepropylène fluoré (**FEP**) aussi connu sous le nom commercial "**Teflon**" qui a des usages extrêmement variés. Les polymères fluorés sont généralement des polymères de poids moléculaire élevé.

➤ **Les précurseurs**

Les précurseurs sont notamment utilisés en tant qu'intrant dans une chaîne de production. Leur transformation durant le processus peut induire la production de substances non-désirées. **Les précurseurs sont des substances reconnues comme ayant le potentiel de se dégrader en acides perfluorocarboxyliques** avec une longueur de chaîne carbonée en C8 et plus (y compris le PFOA) ou en sulfonates de perfluoroalkyle avec une longueur de chaîne carbonée en C6 ou plus (y compris PFHxS et PFOS). Par exemple, certains produits chimiques monomères résiduels issus du processus de fabrication des télomères, tels que les alcools télomères et les iodures de télomères, sont des précurseurs du PFOA car ils peuvent rester dans le produit final et être transformés en PFOA [5].

Un groupe de substance appelé **les télomères**, est utilisé comme précurseur. Les télomères sont des composés fluorés produits par un procédé spécifique de fabrication de polymère appelé télomérisation. Les télomères ne sont pas techniquement perfluorés, car toutes les liaisons carbone-hydrogène ne sont pas remplacées par des liaisons carbone-fluor : le télomère se termine par un groupe CH₂CH₂. La plupart des télomères sont des polymères relativement petits et sont utilisés dans les produits de traitement de surface pour conférer une résistance à la saleté, aux taches, à la graisse et à l'eau aux tapis, aux textiles, au papier, à la pierre et au cuir. Certains sont utilisés comme tensioactifs de haute performance dans des produits qui doivent s'écouler uniformément, tels que les peintures, les revêtements et les produits de nettoyage, les mousses anti-incendie destinées aux incendies de combustibles liquides ou les revêtements techniques extrêmement fins utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs [7]. Les familles les plus étudiées de précurseurs sont les suivantes :

- **Les Sulfonates fluorotélomères (FTS)**

Un exemple de ce groupe de substances est le 6:2 sulfonate de fluorotélomère (**6:2 FTS**). Le 6:2 FTS est composé de six atomes de carbone entièrement fluorés, de deux atomes de carbone non fluorés et d'un groupe sulfonate. C'est un exemple de précurseur de PFCA. Le 6:2 FTS est utilisé en remplacement du PFOS à diverses fins. Ils sont notamment utilisés dans la mousse anti-incendie et comme tensioactif pour des applications industrielles sur les semi-conducteurs [7] [8].

- **Les Diesters d'acide polyfluoroalkylphosphorique (diPAP)**

Un exemple de ce groupe de substances est le 8:2 diester de phosphate de fluorotélomère (**8:2 diPAP**). Les PAP sont utilisés notamment dans l'industrie papetière en tant

qu'imperméabilisant. Les PAP sont très souvent retrouvés dans les stations d'épuration car ils sont utilisés dans le papier toilette et dans les produits cosmétiques [9] [10].

- **Les Perfluoroalcanes sulfonamides**

Un exemple de ce groupe de substances est l'acide perfluorooctane sulfonique (**PFOSA**). Cette substance est un exemple de précurseur qui peut se dégrader en PFOS.

- **Les autres PFAS**

Un certain nombre d'autres PFAS sont utilisés en tant que substitut de PFAS interdits ou à usage restreint, notamment du PFOA. Plus précisément, il s'agissait de **HFPO-DA (« GenX »)**, de **l'ADONA¹** et de deux composants de **F53B** (composant majeur 9CIPF3ONS et composant mineur 11CIPF3OUdNS). Le HFPO-DA est utilisé par Chemours pour remplacer le PFOA dans la production de téflon, l'ADONA est utilisé par 3M à Anvers et le F53B est utilisé en Chine.

Certains PFAS à chaîne très courte (C2-C3) tels que les substances du groupe HFO sont également utilisés comme fluide frigorigère dans les pompes à chaleur, les climatiseurs, les réfrigérateurs, les chambres froides... Les **HFO** sont plutôt volatiles et se trouvent donc peu dans l'eau mais certains produits de dégradation peuvent se retrouver dans le milieu aqueux tels que l'Acide trifluoroacétique (**TFA**) et l'acide trifluorométhane (**TA**).

Des études récentes [11] [12] ont permis d'identifier que les TFA sont très présents dans les eaux superficielles et les eaux souterraines. **Les TFA sont les produits de dégradation finaux des PFAS, des gaz fluorés, de pesticides organofluorés, de biocides, de nombreux médicaments et d'autres substances fluorées.** Ils sont très stables et très mobiles dans l'environnement mais peu bioaccumulable. Ils sont pour l'instant considérés comme des métabolites non-pertinents dans la DCE et leur effet toxique est très peu documenté.

Les PFAS sont un large groupe de substances très diversifiées qui trouvent de très nombreuses applications. Leurs propriétés chimiques en font aussi des substances très stables non dégradées dans l'environnement, persistantes, très mobiles et bioaccumulables. Les PFAS sont qualifiés de « polluants éternels » ou de « Forever Chemical » (F-C). Actuellement, les PFAS les plus étudiés sont les substances issues des familles PFSA et PFCA avec une chaîne carbonée composée de 4 à 14 atomes de carbone.

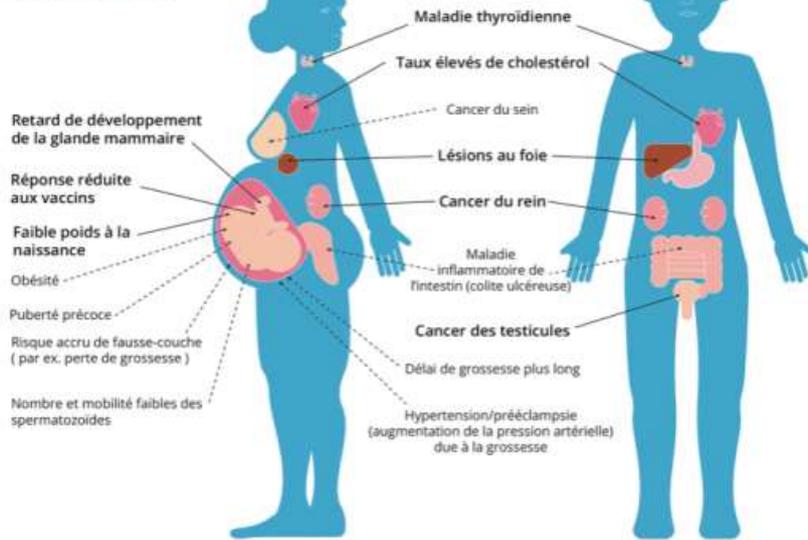
1.2.2 Effets sur la santé et voies d'exposition

Le 1er décembre 2023, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le **PFOA** comme « **cancérogène pour les humains** » (groupe 1) et le **PFOS** comme substance « **cancérogène possible pour l'homme** » (groupe 2B). Les PFAS ont également des effets sur la **diminution de la réponse immunitaire à la vaccination, la dyslipidémie** (anomalie lipidique due à du cholestérol et/ou des triglycérides élevés), **la baisse du poids de naissance et l'augmentation du risque de cancer du rein**. D'autres types d'effets sur la santé sont suspectés comme : **des maladies thyroïdiennes, des troubles de la reproduction, baisse de la fertilité**, mais avec un niveau de preuve scientifique moins élevé. Le schéma ci-dessous résume les effets connus et supposés des PFAS sur la santé humaine [13].

¹ A noter que L'ADONA se dissocie dans l'eau en DONA.

— Niveau élevé de certitude
- - - Niveau faible de certitude

**Effets sur le développement
de l'enfant à naître**



Sources: US National Toxicology Program (2016); CB Health Project Reports (2012); CIRCOOMS (2017); Barry et al. (2013); Fenton et al. (2009); et White et al. (2011) apud Emerging chemical risks in Europe — 'PFAS'.

Figure 5: Effets des PFAS sur la santé humaine [14]

La principale source d'exposition humaine au PFAS est l'alimentation, via des contaminations directes ou indirectes (via la contamination des sols et la chaîne alimentaire) des denrées suivantes[13] :



- La consommation de produits de la mer, de viande, de fruits, d'œufs
- La consommation de boissons
- L'air intérieur et extérieur est une voie d'exposition possible mais moins importante, ainsi que l'ingestion de poussières contaminées

Afin de limiter les risques d'exposition humaines et des écosystèmes, il est donc nécessaire de limiter le plus possible les PFAS à la source et d'éviter leur diffusion dans les sols et l'eau.

Les PFAS sont connus pour avoir des effets nocifs sur la santé. La principale source d'exposition humaine aux PFAS est l'alimentation. La protection des sols et des ressources en eaux est donc essentielle afin de limiter les risques d'exposition. La solution la plus probante est évidemment l'interdiction de production des PFAS.

1.3. Contamination aux PFAS en Belgique

Les campagnes de mesures réalisées dans le cadre d'études scientifiques ou de programmes nationaux à travers le monde indiquent une présence régulière des PFAS dans les différents compartiments de l'environnement bien au-delà des sites industriels de production ou d'utilisation. Les mesures réalisées sur les eaux et les boues de stations d'épuration en Europe, en Amérique du Nord, en Asie et en Australie montrent la présence avérée de PFAS dans les systèmes d'assainissement. Par conséquent, les stations d'épuration sont identifiées comme étant une voie de transfert importante de la pollution vers le milieu naturel malgré le traitement réalisé en amont [4].

Début 2023, l'enquête collaborative « Forever Chemical Project » [15] a documenté et cartographié l'état de connaissance sur la contamination de l'Europe par les substances PFAS. Cette étude a révélé la contamination de plus de 17.000 sites en Europe².

La carte des sites évalués par ce projet est consultable sur le site <https://foreverpollution.eu/>. Cette cartographie, dont un extrait est visible en figure 6, montre que 300 sites sont localisés en Belgique principalement en Flandre (Anvers, Gant) et en région Bruxelloise et que certains sites sont considérés comme des hotspots.

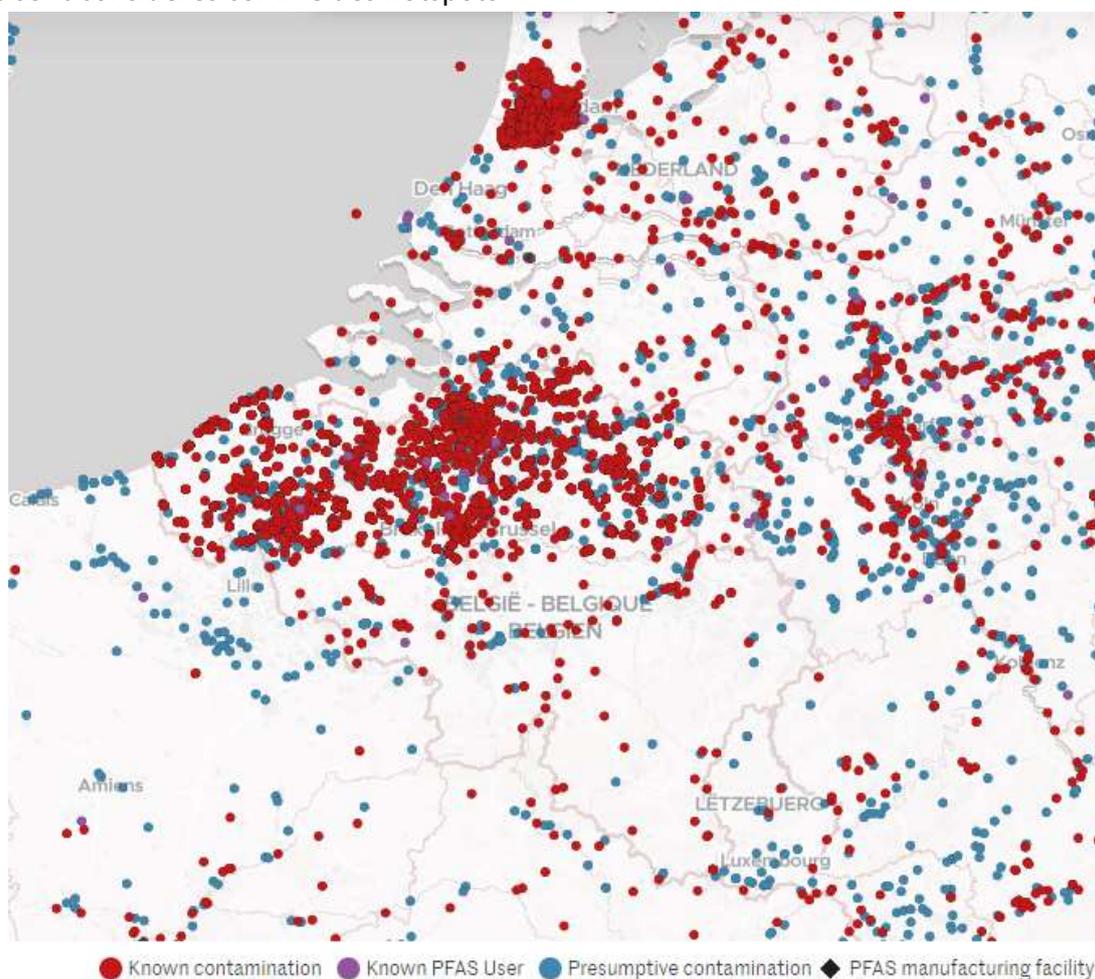


Figure 6: Carte "Forever pollution project" zoomée sur la Belgique

² Pour "Forever pollution project" un site est contaminé dès qu'il dépasse les 10 ng/L ou ng/kg et qu'il s'agit d'un hotspot dès qu'il dépasse 100 ng/L ou ng/kg. Il ne s'agit pas ici de limites légales mais de seuil d'alerte basé sur des données scientifiques mais utilisés à des fins de communication.

Suite à la détection de concentrations importantes de PFAS dans une large zone autour du site de production de 3M à Anvers, le Gouvernement flamand a entrepris en juin 2021 de mener une campagne de mesures dans les sols et les eaux souterraines sur des sites à haut risque de contamination PFAS (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**7)[16].

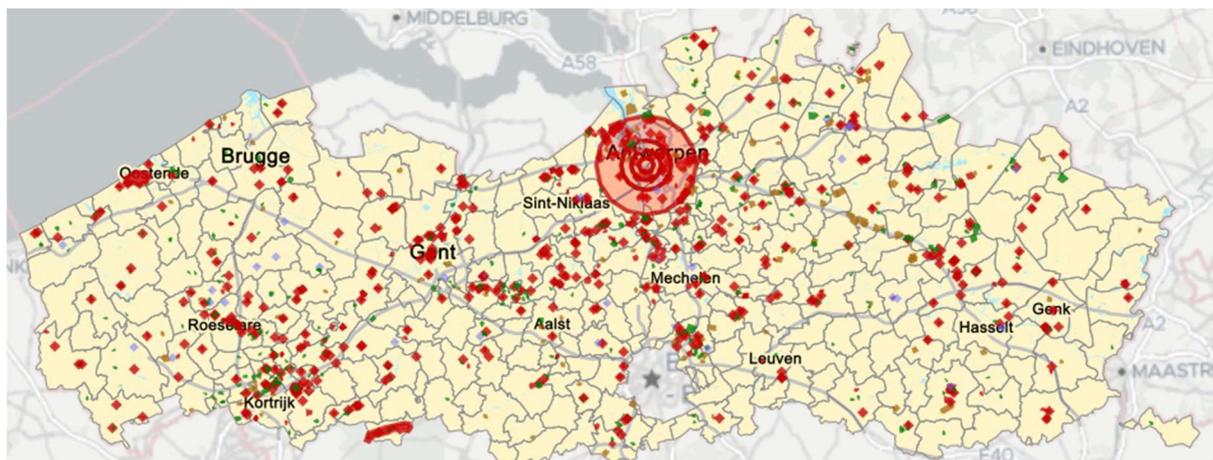


Figure 7: Sites de risque PFAS. Les sites sont délimités par un code couleur (rouge, jaune et vert) en fonction de l'état et des résultats de la recherche sur les sols [17] .

Un grand nombre de sites ont été identifiés pour une investigation plus poussée. De façon générale, les sites les plus inquiétants étaient des sites industriels où les PFAS sont/ont été utilisés ainsi que les sites d'entraînement des pompiers et les sites d'incendie ayant nécessité l'utilisation de mousses d'extinction contenant des PFAS [18] [19].

D'après les données disponibles sur le site : <https://int-web.vmm.be/ibmcognos/bi/?perspective=home>³, Des mesures sur 28 PFAS sont réalisées sur les principales stations d'épuration de la Flandre depuis au moins 2023 (campagne disponible en juin 2023, novembre 2023 et février 2024). Néanmoins le système ne permet pas d'extraire facilement les données rendant complexe une analyse approfondie de celles-ci. Les principaux PFAS mesurés en sortie de station d'épuration sont le PFBA, PFDA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFOS et le 6:2 FTS. Ces PFAS sont sensiblement les mêmes que ceux retrouvés en Wallonie lors de la 1ère campagne de mesures (voir section 1.3.2).

³ Adresse complète : https://int-web.vmm.be/ibmcognos/bi/?perspective=authoring&pathRef=.public_folders%2FWater%2FMeetnetten%2FIndividuele%2Banalyseresultaten%2Bper%2BRWZI&id=iADB5D409877A4178BA2D011238EB45F4&objRef=iADB5D409877A4178BA2D011238EB45F4&action=run&format=HTML&cmPropStr=%7B%22id%22%3A%22iADB5D409877A4178BA2D011238EB45F4%22%2C%22type%22%3A%22report%22%2C%22defaultName%22%3A%22Individuele%20analyseresultaten%20per%20RWZI%22%2C%22permissions%22%3A%5B%22execute%22%2C%22read%22%2C%22traverse%22%5D%7D

1.3.2 Wallonie

1.3.2.1 Eaux usées traitées et boues d'épuration

Une première campagne de mesures des PFAS a été réalisée entre avril et mai 2024 sur les stations d'épuration publiques (STEP) wallonnes ⁴. Cet « Audit » a consisté en la réalisation d'une mesure des PFAS dans :

- Les eaux traitées en sortie de 443 STEP⁵,
- Les boues issues des 98 unités de déshydratation présentes sur ces stations⁶.

Compte tenu de l'absence actuelle de cadre normatif, tant pour les eaux que pour les boues, le Comité de Suivi, réunissant la SPGE, le SPW-ARNE et l'ISSEP, a décidé de faire analyser l'ensemble des PFAS ciblés par la Directive 2020/2184 (Directive sur l'eau potable - soit 20 PFAS) et par la Directive 2008/105 (Directive sur les normes de qualité environnementale – dont le projet de révision envisage la surveillance de 24 PFAS). De ce fait et afin d'investiguer les deux Directives, 28 PFAS ont été analysés dans les eaux usées épurées en sortie de 443 stations d'épuration (444 échantillons) et 27 ⁷ PFAS ont été analysés dans les boues déshydratées issues de 98 stations d'épuration (112 échantillons). Le Tableau 4 ci-dessous reprend la liste des PFAS suivis.

Tableau 4: Liste des PFAS suivis dans l'« Audit »

		Directive	Directive	Matrice	LOQ EAU	Matrice	LOQ BOUES
		Eau potable	NQE	EAU	(ng/l)	BOUES	(µg/kgMS)
Nombre total de composés		20	24	28		27	
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	X	X	X	10	X	0,5
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA ou PFPA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorohexanoïque	PFHxA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluoroheptanoïque	PFHpA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorooctanoïque	PFOA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorononanoïque	PFNA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnA ou PFUnDA ou PFUDA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorododécanoïque	PFDoA ou PFDoDA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorotridécanoïque	PFTrDA	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorotetradécanoïque	PFTeDA		X	X	10	X	0,1
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA		X	X	10	X	0,1
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA		X	X	10	X	0,1
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluoropentanesulfonique	PFPeS ou PFPS	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorohexane sulfonique	PFHxS	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluoroheptane sulfonique	PFHpS	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluorooctane sulfonique	PFOS	X	X	X	10	X	0,03
Acide perfluorononane sulfonique	PFNS	X		X	10	X	0,1
Acide perfluorodécane sulfonique	PFDS	X	X	X	10	X	0,1
Acide perfluoroundécane sulfonique	PFUnDS	X		X	10	X	0,1
Acide perfluorododécane sulfonique	PFDoDS	X		X	10	X	0,1
Acide perfluorotridécane sulfonique	PFTrDS	X		X	10	X	0,1
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctan-1-ol	6:2 FTOH		X	X	50.000		
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-heptadecafluorodécane-1-ol	8:2 FTOH		X	X	20.000		
bis(2,3,3,3-tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy)propanoic acid) diamine	HFPO-DA (Gen X)		X	X	10	X	0,1
Ammonium 2,2,3-trifluoro-3-(1,1,2,2,3,3,3-hexafluoro-3-(trifluorométhoxy)propoxy)propanoate	ADONA		X	X	10	X	0,1
2,2-difluoro-2-[[2,2,4,5-tetrafluoro-5-(trifluorométhoxy)-1,3-dioxolan-4-yl]oxy]acetic acid	C604		X	X	100	X	1
Acide 6:2 fluorotelomersulfonique	6:2 FTS					X	0,1

⁴ Données non publiées

⁵ Quatre stations d'épuration, en travaux actuellement, n'ont pas pu faire l'objet d'un prélèvement en vue d'une analyse

⁶ 112 échantillons ont été prélevés sur ces stations d'épuration

⁷ Pour les boues, il s'agit en fait de 26 PFAS issus des Directives et 1 PFAS complémentaire. En effet, 2 PFAS (6 :2 FTOH et 8 :2 FTOH) ne pouvaient pas être analysés, avec les protocoles analytiques disponibles lors de la réalisation de la campagne, dans les boues. A contrario, le 6 :2 FTS, retrouvé dans certaines mousses incendie, a été suivi.

Les résultats analytiques montrent que :

- Neuf molécules (PFHxA, PFPeA, PFOS, PFOA, PFBS, PFBA, PFHpA, PFHxS et PFDA) sont détectées dans l'eau en sortie des stations d'épuration, à une fréquence variant entre 0,7% et 7%. Les médianes de tous les paramètres sont inférieures à la LQ. La valeur maximale pour la somme des 28 PFAS est de 1.789 ng/L.
- Seize molécules (PFOS, PFDA, PFDoDA, PFUnDA, PFOA, PFTeDA, PFHxA, 6:2 FTS, PFNA, PFPeA, PFHpA, PFTrDA, PFPeS, PFHxDA, PFBS, PFHxS et) sont détectées dans les boues valorisées en agriculture à une fréquence variant entre 3% et 100%.
- Les PFOS, PFDoDA, PFDA et PFUnDA sont détectés dans plus de 90% des échantillons de boues. Les médianes sont très faibles pour l'ensemble des molécules : entre 0 et 4 µg/kg MS.
- La valeur maximale mesurée dans un échantillon de boues valorisées en agriculture était de 65 µg/kg MS pour le 6:2 FTS (un composé présent dans certaines mousses anti-incendie).
- La valeur maximale mesurée dans un échantillon de boues non valorisées en agriculture était de 96 µg/kg MS pour le PFOS.
- La concentration maximale cumulée est plus faible dans les échantillons de boues valorisées en agriculture (85 µg/kg MS) que ceux de boues non valorisées en agriculture (114 µg/kg MS). La majorité des échantillons de boues (95%) ont des concentrations cumulées pour les 27 PFAS mesurés en dessous de 40 µg/kg MS.

Plus de détails sur les résultats obtenus dans les eaux usées épurées sont présentés ci-dessous :

- Sur la durée de la campagne, 444 échantillons ponctuels d'eau ont été analysés (deux échantillons ont été prélevés dans une station d'épuration possédant une ligne de traitement d'eaux usées industrielles parallèle à la ligne de traitement des eaux usées urbaines).
- Le Tableau 5 reprend les fréquences de détection, les teneurs minimales, maximales et médianes mesurées pour chacune des 28 molécules PFAS suivies dans les eaux en sortie des stations d'épuration.
- Dix-neuf PFAS (PFNA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFPeS, PFHpS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS, HPFO-DA/GenX, DONA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, C6O4, 6:2 FTOH et 8:2 FTOH) n'ont jamais été détectés.
- Les deux substances les plus souvent détectées sont le PFPeA et le PFHxA (dans 6 et 7 % des échantillons, respectivement).
- Les gammes des concentrations mesurées varient entre la limite de quantification (< 10 ng/L pour la majorité des composés) et 1.300 ng/L. Cette valeur extrême n'a été constatée que dans un échantillon ; les valeurs médianes sont en-dessous de la limite de quantification pour tous les composés.

Tableau 5 : PFAS suivis et détectés dans les EAUX USÉES ÉPURÉES en sortie des stations d'épuration lors de l'« Audit » (444 échantillons)

Nom de la molécule	Abréviation	Min ng/L	Max ng/L	Médiane ng/L	Fréquence de détection
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	< 10	99	< 10	2%
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	< 10	440	< 10	6%
Acide Perfluorohexanoïque	PFHxA	< 10	1300	< 10	7%

Acide Perfluoroheptanoïque	PFHpA	< 10	88	< 10	1%
Acide Perfluorooctanoïque	PFOA	< 10	75	< 10	2%
Acide perfluorononanoïque	PFNA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	< 10	21	< 10	0,5%
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnDA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorotridécanoïque	PFTTrDA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	< 10	90	< 10	2%
Acide perfluoropentanesulfonique	PFPeS	< 10	< 10	< 10	0,7%
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	< 10	19	< 10	0%
Acide perfluoroheptanesulfonique	PFHpS	< 10	< 10	< 10	4%
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	< 10	64	< 10	0%
Acide perfluorononanesulfonique	PFNS	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorodécanesulfonique	PFDS	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluoroundécanesulfonique	PFUnDS	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorododécanesulfonique	PFDoDS	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorotridécanesulfonique	PFTTrDS	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluoro(2-méthyl-3-oxahexanoïque)	HFPO-DA/Gen X	< 10	< 10	< 10	0%
Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	DONA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorotétradécanoïque	PFTTeDA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	< 10	< 10	< 10	0%
Acide perfluoro([5-méthoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acétique	C6O4	< 100	< 100	< 100	0%
2-Perfluorohexyl éthanol	6:2 FTOH	< 50.000	< 50.000	< 50.000	0%
2-Perfluorooctyl éthanol	8:2 FTOH	< 20.000	< 20.000	< 20.000	0%

La carte reprise à la Figure 8 présente de façon synthétique les résultats obtenus dans les eaux usées épurées en sortie des 443 stations ayant participé à la campagne⁸. La taille des points symbolisant les stations reflète la capacité de celles-ci (nombre d'équivalents-habitants (EH) traités⁹).

⁸ Pour une des stations d'épuration, deux échantillons ont été prélevés, car celle-ci possède une ligne de traitement d'eaux usées industrielles séparée de la ligne de traitement des eaux usées urbaines, les eaux épurées se rejoignant avant le rejet. Pour ce site, la concentration présentée est la moyenne des deux concentrations mesurées pondérées par le volume d'eau traité sur chaque ligne (le volume d'eaux usées urbaines étant beaucoup plus élevé : 1840 m³/h en moyenne vs. 10 m³/h en moyenne).

⁹ L'équivalent-habitant est une notion théorique, établie sur base d'un grand nombre de mesures, qui exprime la charge polluante d'un effluent (quelle que soit l'origine de la pollution) par habitant et par jour.

Pour la majorité des 443 sites dont les effluents ont été analysés, aucun PFAS n'a été quantifié (379 sites). Pour 58 stations, la somme des PFAS mesurés dans les eaux épurées est inférieure à 100 ng/L. Pour 4 stations, la somme des PFAS est comprise entre 100 ng/L et 500 ng/L. La somme des 28 PFAS mesurés est plus élevée dans les eaux épurées de 2 stations, une à 942 ng/L et une à 1789 ng/L.

Somme des 28 PFAS en sortie des stations d'épuration
Campagne avril-mai 2024

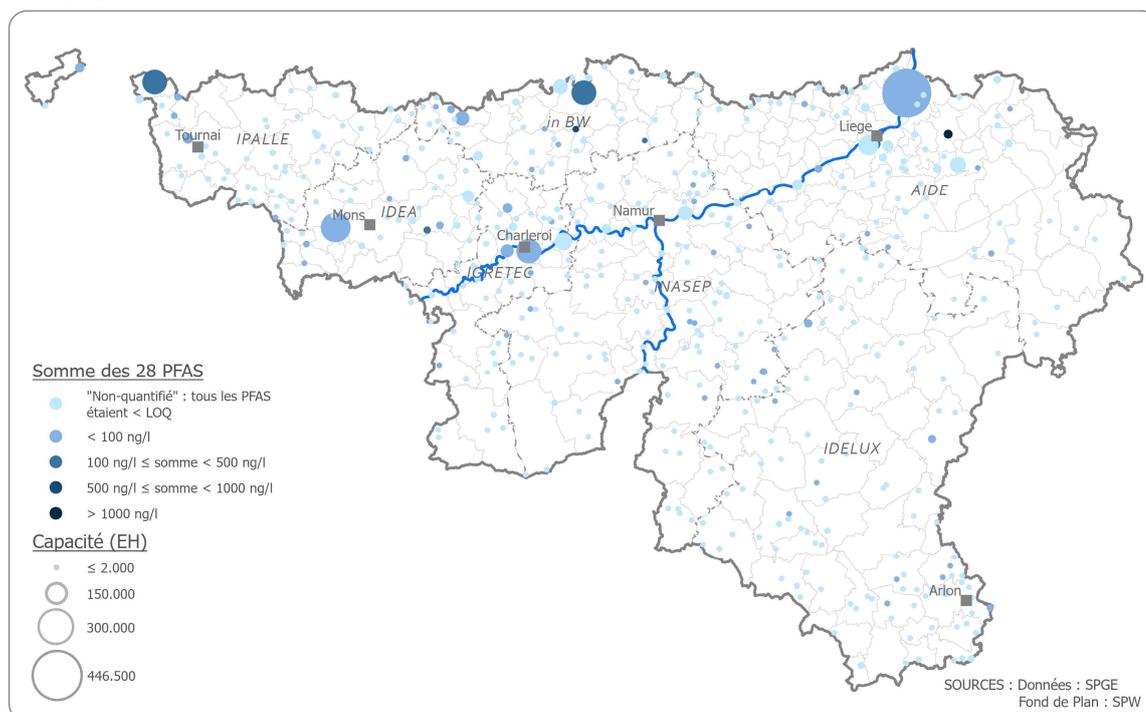


Figure 8 : Somme des 28 PFAS en sortie des stations d'épuration

En ce qui concerne les boues, sur la durée de la campagne, 112 échantillons de boues déshydratées ont été analysés, sur 98 stations d'épuration. La production de boues en Région wallonne, en 2023, est d'environ 170.000 tonnes de boues.

Le Tableau 6 reprend les fréquences de détection, les teneurs minimales, maximales et médianes mesurées pour chacune des 27 molécules PFAS mesurées dans des échantillons de boues.

Dix PFAS (PFHpS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS, HPFO-DA/GenX, DONA, PFODA et C6O4) n'ont jamais été détectés.

Sept PFAS sont détectés dans plus de la moitié des échantillons (PFOS, PFDoDA, PFDA, PFUnDA, PFOA, PFTeDA et PFHxA). Parmi ceux-ci, quatre ont été détectés dans plus de 90% des cas (PFOS, PFDA, PFDoDA et PFUnDA) et un a été détecté dans tous les échantillons (PFOS).

Les gammes des concentrations mesurées varient, par PFAS, entre la limite de quantification (< 0,1 µg/kg MS pour la majorité des composés) et 96 µg/kg MS dans un seul échantillon.

La concentration maximale cumulée (somme des 27 PFAS) était de 114 µg/kg MS. La majorité des échantillons de boues (95%) montrent une concentration maximale de la somme des 27 PFAS de moins de 40 µg/kg MS.

Tableau 6 : PFAS suivis et détectés dans les BOUES des stations d'épuration lors de l'« Audit » (112 échantillons)

Nom de la molécule	Abréviation	Minimum (µg/kg MS)	Maximum (µg/kg MS)	Médiane (µg/kg MS)	Fréquence de détection
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	< 0,5	4	< 0,5	1%
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	< 0,1	29	< 0,1	34%
Acide Perfluorohexanoïque	PFHxA	< 0,1	19	0,3	55%
Acide Perfluoroheptanoïque	PFHpA	< 0,1	5	< 0,1	17%
Acide Perfluorooctanoïque	PFOA	< 0,1	13	0,8	87%
Acide perfluorononanoïque	PFNA	< 0,1	3	< 0,1	47%
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	< 0,1	11	2	98%
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnDA	< 0,1	2	0,6	94%
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA	< 0,1	6	1	99%
Acide perfluorotridécanoïque	PFTTrDA	< 0,1	0,7	< 0,1	17%
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	< 0,1	0,5	< 0,1	2%
Acide perfluoropentanesulfonique	PFPeS	< 0,1	0,9	< 0,1	4%
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	< 0,1	0,9	< 0,1	2%
Acide perfluoroheptanesulfonique	PFHpS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	0,7	96	5	100%
Acide perfluorononanesulfonique	PFNS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorodécanesulfonique	PFDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoroundécanesulfonique	PFUnDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorododécanesulfonique	PFDoDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorotridécanesulfonique	PFTTrDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoro(2-méthyl-3-oxahexanoïque)	HFPO-DA/Gen X	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	DONA	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorotétradécanoïque	PFTTeDA	< 0,1	2	0,3	61%
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA	< 0,1	0,3	< 0,1	3%
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoro([5-méthoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acétique	C6O4	< 1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique	6:2 FTS	< 0,1	65	< 0,1	35%

Parmi les 112 échantillons de boues analysés, 77 échantillons portaient sur 63 stations d'épuration dont les boues sont valorisées en agriculture (soit environ 115.000 tonnes de boues).

Le Tableau 7 reprend les fréquences de détection, les teneurs minimales, maximales et médianes mesurées pour chacune des 27 molécules PFAS mesurées dans les échantillons de boues valorisées en agriculture.

Onze PFAS (PFBA, PFHpS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTTrDS, HPFO-DA/GenX, DONA, PFODA et C6O4) n'ont pas été détectés dans les échantillons de boues valorisées en agriculture.

Sept PFAS sont détectés dans plus de la moitié des échantillons de boues valorisées en agriculture (PFOS, PFDoDA, PFDA, PFUnDA, PFOA, PFTeDA et PFHxA,). Parmi ceux-ci, quatre ont été détectés dans plus de 90% des cas (PFOS, PFDoDA, PFDA et PFUnDA) et un a été détecté dans tous les échantillons (PFOS).

Les gammes des concentrations mesurées varient, par PFAS, entre la limite de quantification (< 0,1 µg/kg MS pour la majorité des composés) et 65 µg/kg MS. Les composés retrouvés à la plus forte concentration sont le 6:2 FTS (65 µg/kg MS) et le PFOS (60 µg/kg MS) dans les échantillons de boues valorisées en agriculture.

La concentration maximale cumulée (somme des 27 PFAS) était de 85 µg/kg MS dans les échantillons de boues valorisées en agriculture. La majorité des échantillons (95%) ont une concentration cumulée de moins de 40 µg/kg MS.

Tableau 7 : PFAS suivis et détectés dans les BOUES des stations d'épuration valorisées en agriculture lors de l'« Audit »

Nom de la molécule	Abréviation	Minimum (µg/kg MS)	Maximum (µg/kg MS)	Médiane (µg/kg MS)	Fréquence de détection
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	< 0,5	<0,5	< 0,5	0%
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	< 0,1	5	< 0,1	29%
Acide Perfluorohexanoïque	PFHxA	< 0,1	19	0,3	57%
Acide Perfluoroheptanoïque	PFHpA	< 0,1	1	< 0,1	16%
Acide Perfluorooctanoïque	PFOA	< 0,1	6	0,7	83%
Acide perfluorononanoïque	PFNA	< 0,1	3	< 0,1	45%
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	< 0,1	11	2	97%
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnDA	< 0,1	2	0,5	92%
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA	< 0,1	6	1	99%
Acide perfluorotridécanoïque	PFTTrDA	< 0,1	0,7	< 0,1	14%
Acide perfluorobutanesulfonique	PFBS	< 0,1	0,5	< 0,1	3%
Acide perfluoropentanesulfonique	PFPeS	< 0,1	0,9	< 0,1	6%
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	< 0,1	0,9	< 0,1	3%
Acide perfluoroheptanesulfonique	PFHpS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	0,8	60	4	100%
Acide perfluorononanesulfonique	PFNS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorodécanesulfonique	PFDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoroundécanesulfonique	PFUnDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorododécanesulfonique	PFDoDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorotridécanesulfonique	PFTTrDS	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoro(2-méthyl-3-oxahexanoïque)	HFPO-DA/Gen X	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	DONA	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluorotétradécanoïque	PFTeDA	< 0,1	2	0,3	60%
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA	< 0,1	0,3	< 0,1	4%
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide perfluoro([5-méthoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acétique	C6O4	< 1	< 0,1	< 0,1	0%
Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique	6:2 FTS	< 0,1	65	< 0,1	43%

La carte reprise en Figure 9 présente de façon synthétique la somme des 27 PFAS mesurés dans les boues produites par 98 sites équipés d'unités de déshydratation. La taille des points qui indiquent ces sites sur la carte reflète la quantité de boues produite par le site en 2023. Certains sites ont fait l'objet de plusieurs prélèvements. Dans ce cas, c'est la valeur médiane des sommes de concentrations qui est présentée sur la carte.

Somme des 27 PFAS dans les boues issues des stations d'épuration
Campagne avril-mai 2024

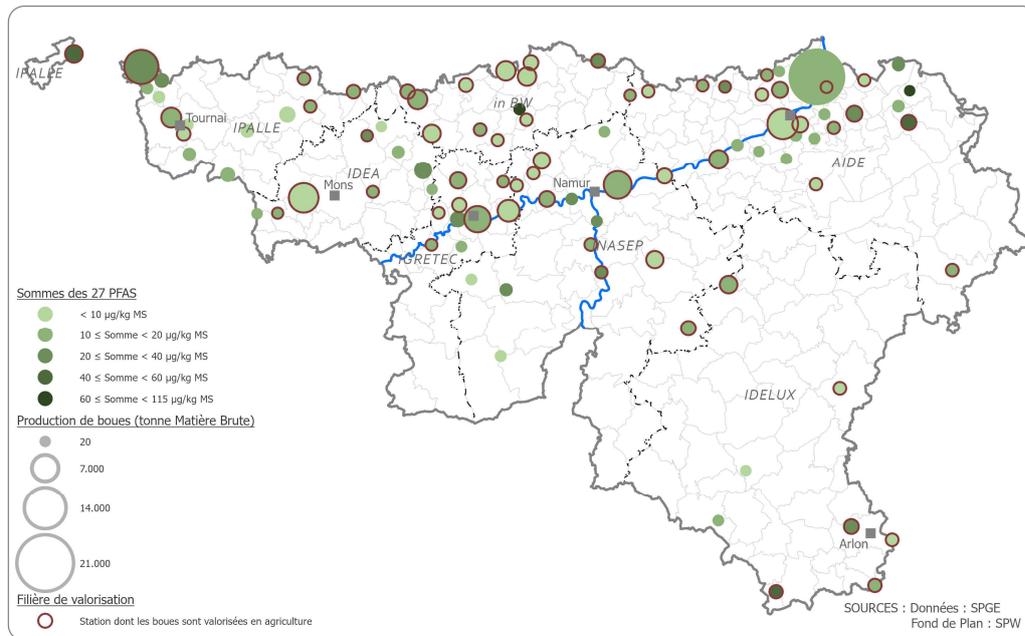


Figure 9 : Somme des 27 PFAS dans les boues des stations d'épuration

Pour la majorité des sites (79 sites), la somme des 27 PFAS est inférieure à 20 µg/kg MS (dont 33 sites avec la somme inférieure à 10 µg/kg MS). Pour 14 sites, la somme des PFAS est comprise entre 20 µg/kg MS et 40 µg/kg MS. Pour 3 sites, la somme des PFAS est comprises entre 40 µg/kg MS et 60 µg/kg MS. Les sommes de PFAS mesurées dans les boues produites par deux sites étaient supérieures à 100 µg/kg MS, soit respectivement 109, 24 µg/kg MS et 113,92 µg/kg MS.

1.3.2.2 Sols

Selon la Direction de l'Assainissement des Sols du Service Public de Wallonie, en 2023, 18 sites sont répertoriés pour une contamination aux PFAS (cf graphique ci-dessous). 12 de ces sites ont été contaminés par l'usage de mousses anti-incendie AFFF. Les autres sources de contamination correspondent à des sites de traitement des déchets (2) et des sites industriels : papeterie (1), traitement de surface (1) et traitement de textile (2). Il est important de noter que le recensement des sites contaminés est pour l'instant incomplet et que ce travail sera complété au fur et à mesure [8].

1. Production de PFAS et production de Téflon
2. traitement de surface des métaux
3. **industrie textile : traitement et imperméabilisation**
4. production de cartes de circuits imprimés
5. **production de papier hydrofuge / anti graisse**
6. industrie de la photo et des peintures (utilisation de produits contenant PFAS)
7. fluides hydrauliques
8. Produits cosmétiques et agents de nettoyage
9. **Utilisation de mousses AFFF**
10. **Traitement des déchets**

NOMBRE DE TERRAINS AVEC POLLUTION

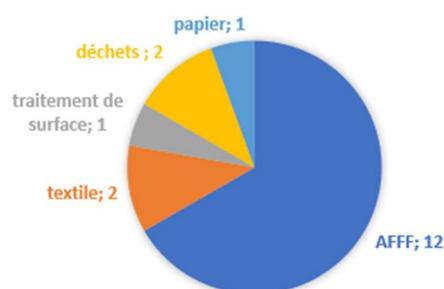


Figure 10 : Nombre de terrain avec pollution en Wallonie [8]

Les PFAS ont une origine exclusivement anthropique, ils se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement. La contamination des eaux et des sols par les PFAS est quasiment généralisée avec des taux très variables selon les caractéristiques de la zone et les secteurs d'activités en présence.

Les stations d'épuration sont connues pour être une des principales voies de transfert du fait qu'elles récoltent les eaux usées issues des diverses activités anthropiques. Les premières campagnes de suivi réalisées en Flandre et en Wallonie confirment la présence d'une dizaine de PFAS dans les boues et les eaux en sortie de station d'épuration à des concentrations variables. Par conséquent, il est pertinent de mettre en place une stratégie de surveillance afin d'avoir une vision plus précise des concentrations en PFAS dans les eaux et les boues et éventuellement mettre en place des mesures de prévention et de limitation du risque lié aux PFAS.

2. Exigences réglementaires, normes et recommandations

Avertissement : La réglementation et les normes applicables aux PFAS sont en pléines révisions. De nombreux pays européens ne disposent pas encore de règle nationale et visent simplement une transposition des règles européennes lorsqu'elles seront disponibles. Plusieurs pays non-européens ont annoncé leur volonté d'étendre la liste des PFAS concernés et de définir ou réviser les seuils applicables aux PFAS au cours de l'année 2024. L'état des lieux dressé ci-dessous est donc amené à évoluer rapidement.

2.1. Niveau international

La convention de Stockholm (2001), accord international visant à encadrer certains polluants organiques persistants, réglemente plusieurs composés de la famille des PFAS au niveau mondial [20]. La production et l'utilisation du **PFOS** sont restreintes depuis 2009 (modifiée en 2019) à une liste d'usages spécifiques qui peuvent être acceptés (photo-imagerie, certains revêtements photorésistants et antireflet, agent de gravure pour semi-conducteurs composés et céramiques filtres, fluides hydrauliques pour l'aviation, placage métallique dans les systèmes en boucle fermée, certains dispositifs médicaux, mousse anti-incendie, certains appâts à insectes). Le **PFOA** est interdit à l'import, l'export, à la production et à l'utilisation, sauf exemptions particulières, depuis 2019 [21].

En juin 2022, les parties à la Convention de Stockholm ont décidé d'inclure le **PFHxS**, ses sels et composés associés dans le traité [21].

Les acides carboxyliques perfluorés à longue chaîne (**PFCA en C9-21**) sont envisagés pour inclusion dans la Convention de Stockholm et, par conséquent, pour leur élimination à l'échelle mondiale [21] [2].

L'Organisation Mondiale de la Santé - OMS - a proposé, le 29/09/2022 [22], **une exposition maximale autorisée au PFOS et au PFOA à 0,1 µg/L chacun pour l'eau potable**. De plus, l'OMS a proposé une **exposition maximale autorisée de 0,5 µg/L dans l'eau potable, pour tous les PFAS** que les méthodes actuellement disponibles peuvent mesurer, soit 30 PFAS différents. [22]

La Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination [23] classe les boues d'épuration comme des déchets dangereux inclus dans la liste A1 des déchets pouvant contenir des métaux (code A1120)¹⁰. Les boues contenant des PFAS et plus généralement des POPs peuvent aussi tomber sous le coup des restrictions imposées par la **Convention de Stockholm**. L'exportation des boues est donc limitée et doit se faire en conformité avec la **Convention de Rotterdam** [24] sur le consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques dangereux faisant l'objet d'un commerce international.

¹⁰ En Région wallonne, les boues urbaines résiduelles ne sont pas considérées comme des "déchets dangereux" mais comme des "déchets".

2.2. Niveau européen

En Europe, la réglementation des PFAS est couverte par plusieurs règlements et directives. Plusieurs actions sont en cours pour étendre la convention de Stockholm à d'autres substances de la famille des perfluorés. Les initiatives européennes sur le sujet ont été mises en avant en 2020, en cohérence avec la stratégie de l'Union européenne pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques. Plusieurs réglementations viennent d'être actualisées ou vont l'être prochainement avec des prises d'effet en 2026.

2.2.1 *Le Règlement Polluants Organiques Persistants*

Le règlement POP (polluants organiques persistants) issu de la convention de Stockholm a **interdit le PFOS depuis 2009, le PFOA depuis juillet 2020 et le PFHxS depuis juin 2022**. Les interdictions ou restrictions imposées par le règlement POP peuvent porter sur les substances en tant que telles, ou lorsqu'elles sont sous forme de constituants d'articles, ou incorporées dans des préparations au-dessus de certains seuils [25] [26].

2.2.2 *Le règlement REACH 1907/2006*

Le règlement européen REACH (n°1907/2006) vise à sécuriser la fabrication et l'utilisation des substances chimiques en recensant, évaluant et contrôlant les substances chimiques fabriquées, importées et mises sur le marché européen en quantité significative [27]. Toutefois, les polymères (donc certains PFAS) sont actuellement exemptés de l'obligation d'enregistrement et d'évaluation au titre de REACH. Dans le cadre de la revue de la réglementation REACH en cours, la commission a proposé de réintégrer les polymères.

L'annexe XVII du Règlement **REACH réglemente de façon très restrictive le PFOS, depuis 2008**. Seules certaines utilisations sont autorisées dans la photographie, les fluides hydrauliques, l'aviation et le traitement de surface de métaux. **Le PFOA et ses sels sont également réglementés depuis 2017**, avec effet différé au 4 juillet 2023 pour quelques utilisations dans les domaines de la santé, la sécurité et au 4 juillet 2032 pour les dispositifs médicaux [21].

Les acides carboxyliques perfluorés (**PFCA en C9-14**), leurs sels et leurs précurseurs sont réglementés dans l'UE/EEE **depuis février 2023** suite à une décision prise par la Commission européenne sur proposition des autorités allemandes et suédoises [21].

L'Allemagne a proposé une restriction supplémentaire pour le PFHxA, ses sels et les substances apparentées. Cette proposition a été évaluée par les comités scientifiques de l'ECHA en décembre 2021. Les États membres de l'UE ont voté en faveur de la proposition de la Commission en février 2024. La restriction sera désormais examinée par le Parlement européen et le Conseil avant de pouvoir être adoptée [21].

Les autorités nationales d'Allemagne, du Danemark, des Pays-Bas, de Norvège et de Suède proposent une restriction couvrant un large éventail d'utilisations de PFAS – à l'appui des déclarations faites au Conseil Environnement de décembre 2019. Elles ont soumis leur proposition à l'ECHA en janvier 2023, et les comités scientifiques de l'ECHA l'évaluent actuellement [21].

Par ailleurs, l'ECHA a introduit en janvier 2022 une proposition de restriction pour les PFAS utilisés dans les mousses anti-incendie. Les comités scientifiques de l'ECHA ont soutenu la proposition dans leurs avis finalisés en juin 2023. La Commission européenne et les pays de

l'UE décideront en temps utile de la restriction. Cette utilisation n'est pas incluse dans la restriction universelle des PFAS proposée par les cinq autorités nationales [21].

Liste « Substances of very high concern » - SVHC

REACH identifie également des substances dites « extrêmement préoccupantes » (« Substances of very high concern » - SVHC), qui sont en cours d'examen pour une éventuelle interdiction future. Pour les PFAS elle concerne le PFOA, certains acides carboxyliques perfluorés (PFCA en C9-14) et le PFHxS.

En juin 2019, janvier 2020 et janvier 2023, trois groupes de PFAS ont été identifiés comme SVHC. Ces groupes sont :

- L'acide 2,3,3,3-tétrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propionique, ses sels et ses halogénures d'acyle (HFPO-DA), un substitut PFAS à chaîne courte du PFOA dans la production de polymères fluorés, a été la première substance ajoutée à la liste de substances candidates. Son sel d'ammonium est communément appelé GenX. [28];
- L'acide perfluorobutane sulfonique (PFBS) et ses sels, un substitut du PFOS ; et
- L'acide perfluoroheptanoïque (PFHpA) et ses sels.

L'évolution de la procédure en cours est consultable à l'adresse suivante [21] : <https://echa.europa.eu/fr/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

2.2.3 Gaz fluorés

Le règlement de l'Union européenne sur les gaz à effet de serre fluorés utilisés dans des produits tels que les climatiseurs, les réfrigérateurs et les pompes à chaleur est entré en vigueur le 11 mars 2024 [29]. Ce règlement vise à freiner le réchauffement climatique en limitant l'utilisation de gaz réfrigérants à fort réchauffement climatique tels que les HFC et les HCFC. Ces deux familles de gaz risquent d'être substituées par des PFAS à chaîne ultra-courte (C2-C3) les **HFO** (HydroFluoro-Oléfines) qui sont connus pour se dégrader en TFA (Acide trifluoroacétique) [30].

2.2.4 La Directive "Pesticides"

La Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable [31] impose que les pesticides ne soient autorisés que si leurs substances actives et leurs « métabolites pertinents » ne dépassent pas des concentrations de 100 nanogrammes par litre (ng/L) dans les eaux souterraines. Les pesticides organofluorés (par exemple le flufénacet) peuvent se dégrader en PFAS à chaîne courte ou ultra-courte notamment les TFA. Néanmoins, les TFA ne sont actuellement pas considérés comme des métabolites pertinents [32].

2.2.5 La Directive sur les eaux destinées à la consommation humaine - EDCH

L'annexe I de la directive européenne sur les eaux destinées à la consommation humaine - EDCH - du 16 décembre 2020 fixe des **teneurs maximales à respecter pour les eaux potables à partir de 2026** [33]:

- pour le **total des PFAS : 0,50 µg/l** ;
- ou **0,10 µg/L pour la somme des 20 PFAS** « substances préoccupantes listées à l'annexe III-B-3 »

Même si les valeurs maximales définies par cette directive sont considérées comme élevées par rapport aux dernières données toxicologiques sur les PFAS, cette directive sert souvent de référence pour la définition des valeurs guides à l'international et pour les autres compartiments de l'environnement car elle considère les 20 PFAS du tableau 8 ci-dessous alors que la plupart des autres réglementations ne portent que sur le PFOS et le PFOA.

Tableau 8 : Liste des 20 PFAS de l'annexe I de la directive EDCH

Nom	Sigle	N°CAS
Acide perfluorodecanoïque	PFDA	335-76-2
Acide perfluorodecane sulfonique	PFDS	335-77-3
Acide perfluoroundecanoïque	PFUnDA/PFUnA	2058-94-8
Acide perfluoroundecane sulfonique	PFUnDS	749786-16-1
Acide perfluorododecanoïque	PFDoDA/PFDoA	307-55-1
Acide perfluorododecane sulfonique	PFDoDS	79780-39-5
Acide perfluorotridecanoïque	PFTrDA	72629-94-8
Acide perfluorotridecane sulfonique	PFTrDS	791563-89-8
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	375-22-4
Acide perfluorobutane sulfonique	PFBS	375-73-5
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	2706-90-3
Acide perfluoropentane sulfonique	PFPeS	2706-91-4
Acide perfluoro-n-hexanoïque	PFHxA	307-24-4
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	355-46-4
Acide perfluoro-n-heptanoïque	PFHpA	375-85-9
Acide perfluoroheptane sulfonique	PFHpS	375-92-8
Acide perfluoro-octanoïque	PFOA	335-67-1
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	1763-23-1
Acide perfluorononanoïque	PFNA	375-95-1
Acide perfluorononane sulfonique	PFNS	68259-12-1

2.2.6 Directive « Emballage » et règlement sur les matériaux en contact avec les aliments

Adoptée en 1994, la directive relative aux emballages et aux déchets d'emballages fixe des prescriptions visant à limiter au maximum la présence de substances dangereuses dans les emballages afin de permettre leur recyclage ou leur élimination sans risque [34]. Elle fixe des pourcentages minima de recyclage en poids de matériaux dont le plastique et le papier (susceptibles de contenir des PFAS) et des règles pour calculer ces valeurs, mais reste à une échelle très générale sans lister spécifiquement les substances considérées comme dangereuses. Pour ce qui concerne les substances dangereuses et leur suivi, elle incite la Commission à développer des méthodes et standards européens. Elle a été amendée par un grand nombre de directives, essentiellement des amendements de ses articles, pour préciser certains points¹¹(directives 2004-12, 2005-20, 2013-2, 2015-720 et 2018-852).

En ce qui concerne le règlement UE 10/2011 relatif aux matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires, qui comprend une liste de substances autorisées dont certains perfluorés, une révision est en cours et le Parlement Européen a voté **l'interdiction de l'utilisation des PFAS dans les emballages en contact avec les denrées alimentaires à partir de 2026.**

2.2.7 Directive sur les substances prioritaires

La directive fille de la Directive Cadre sur l'Eau dite directive NQE qui s'intéresse aux substances prioritaires du 12 août 2013 [35], identifiait déjà **le PFOS** et ses dérivés comme substances dangereuses prioritaires (donc devant disparaître des rejets) avec **une norme de qualité environnementale (NQE)** :

- NQE dans les eaux de surface intérieures, de 0,65 ng/L en moyenne annuelle (MA)
- et 36 µg/L en concentration maximale admissible (CMA).

Des mesures sont prises au sein de l'UE pour envisager davantage de PFAS dans le cadre de cette législation. L'UE a rédigé de nouvelles propositions en octobre 2022 visant à modifier la directive-cadre sur l'eau et la directive sur les eaux souterraines afin d'**élargir la liste des substances prioritaires pour inclure 24 PFAS sous forme d'une somme de PFAS avec des facteurs d'équivalence relative au PFOA** [36] [37].

On notera que cette approche récente (**Relative Potency Factor – RPF**) nécessite de disposer pour chaque substance individuelle d'un ensemble de données de toxicité comparables, mais présente l'avantage de pouvoir disposer d'un indicateur synthétique. **Une méthode équivalente est utilisée depuis longtemps pour la famille des dioxines et furanes.**

Les PFAS identifiées comme SVHC et les PFAS clés souvent trouvés dans l'environnement pourraient par conséquent être identifiées comme substances dangereuses prioritaires. Le projet de 2022 propose une norme de qualité des eaux souterraines et une NQE moyenne annuelle pour les eaux de surface de 0,0044 µg/L d'équivalent PFOA pour la somme de 24 PFAS sélectionnés. Pour le biote, une NQE de 0,0044 µg/kg de poids humide équivalent PFOA est proposée pour la somme de 24 PFAS sélectionnés. **Le texte propose pour chacune des substances une valeur RPF** présentées dans le tableau 9 ci-dessous.

¹¹ Le texte consolidé est disponible à l'adresse : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01994L0062-20180704&qid=1715673434168>.

Tableau 9 : Liste des RPF proposés pour la révision de la directive NQE

Nom	Abréviation	Numéro CAS	Numéro EINECS	RPF
Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	206-397-9	1
Perfluorooctane sulfonic acid	PFOS	1763-23-1	217-179-8	2
Perfluorohexane sulfonic acid	PFHxS	355-46-4	206-587-1	0,6
Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1	206-801-3	10
Perfluorobutane sulfonic acid	PFBS	375-73-5	206-793-1	0,001
Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	206-196-6	0,01
Perfluorobutanoic acid	PFBA	375-22-4	206-786-3	0,05
Perfluoropentanoic acid	PFPeA	2706-90-3	220-300-7	0,03
Perfluoropentane sulfonic acid	PFPeS	2706-91-4	220-301-2	0,3005
Perfluorodecanoic acid	PFDA	335-76-2	206-400-3	7
Perfluorododecanoic acid	PFDoDA/PFDoA	307-55-1	206-203-2	3
Perfluoroundecanoic acid	PFUnDA/PFUnA	2058-94-8	218-165-4	4
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9	206-798-9	0,505
Perfluorotridecanoic acid	PFTTrDA	72629-94-8	276-745-2	1,65
Perfluoroheptane sulfonic acid	PFHpS	375-92-8	206-800-8	1,3
Perfluorodecane sulfonic acid	PFDS	335-77-3	206-401-9	2
Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	376-06-7	206-803-4	0,3
Perfluorohexadecanoic acid	PFHxDA	67905-19-5	267-638-1	0,02
Perfluorooctadecanoic acid	PFODA	16517-11-6	240-582-5	0,02
Ammonium perfluoro 2-methyl-3-oxahexanoate	HFPO-DA/Gen X	62037-80-3		0,06
Propanoic Acid / Ammonium 2,2,3-trifluoro-3-(1,1,2,2,3,3-hexafluoro-3-(trifluoromethoxy)propoxy)propanoate	ADONA	958445-44-8		0,03
2-(Perfluorohexyl)ethyl alcohol	6:2 FTOH	647-42-7	211-477-1	0,02
2-(Perfluorooctyl)ethanol	8:2 FTOH	678-39-7	211-648-0	0,04
Acetic acid / 2,2-difluoro-2-((2,2,4,5-tetrafluoro-5-(trifluoromethoxy)-1,3-dioxolan-4-yl)oxy)	C6O4	1190931-41-9		0,06

2.2.8 Directive ERU

La directive relative au traitement des eaux résiduaires urbaines adoptée en 1991 est en cours de révision [38]. La proposition initiale était assez ambitieuse car elle prévoyait la mise en place d'un traitement quaternaire visant à éliminer les micropolluants avec une échéance à 2035 pour les agglomérations de plus de 100 000 Equivalents Habitants (EH) et une application à toutes les agglomérations de plus de 10 000EH en 2040. Cette ambition a largement été revue et la version définitive du texte¹² ne prévoit plus que, **d'ici 2045, la mise en place d'un traitement quaternaire**, visant à éliminer le plus large spectre possible de micropolluants, sur

¹² https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc078ec8-55f7-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF

les stations de plus de 150 000 EH (ou à partir de 10 000 EH sur la base d'une évaluation des risques). La surveillance obligatoire portera sur un abattement moyen de 80% sur la somme d'au moins 6 substances **indicatrices** sur 12 listées, sélectionnées pour leur facilité de traitement ou d'élimination. **Néanmoins cette liste ne comporte pas de PFAS.**

La **surveillance des paramètres de santé publique** (comme les virus connus et les agents pathogènes émergents), des polluants émergents dont les micropolluants (dont font partie les PFAS) et les microplastiques ainsi que la résistance aux antimicrobiens feront l'objet d'une surveillance stricte.

Pour cela chaque pays devra mettre en place **au plus tard le 1er janvier 2025**, une **structure de coordination entre les autorités responsables de la santé publique et celles chargées du traitement des eaux résiduaires urbaines**. Cette structure déterminera les paramètres pertinents à surveiller (en plus des 12 obligatoires listés dans le texte) ainsi que la fréquence et la méthode à appliquer.

Comme dans la directive ERU actuelle, la surveillance des eaux résiduaires urbaines implique un nombre annuel d'analyses dépendant de la taille de l'agglomération. La proposition introduit une nouvelle obligation de suivi des micropolluants **à partir de 10 000 EH : un échantillon par mois, et à partir de 50 000 EH deux échantillons par semaine.**

2.2.9 Directive Boues - SSD

La directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture [39], également appelée directive sur les boues d'épuration ou directive SSD, vise à encourager l'utilisation des boues d'épuration en agriculture tout en prévenant les incidences négatives sur la santé et l'environnement. Elle fixe des exigences de qualité pour les boues et les sols sur lesquels elles doivent être utilisées, en fixant des concentrations maximales pour sept métaux lourds (le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc, le mercure, le chrome) présents dans ces boues. Elle impose en outre le traitement des boues avant épandage et la prise en compte des besoins nutritionnels des plantes.

L'évaluation de cette directive [40] publiée en mai 2023 a mis en avant le besoin d'intégrer de nouveaux paramètres à suivre tels que les composés organiques (dont les PFAS), les agents pathogènes, les produits pharmaceutiques et les microplastiques.

2.2.10 Règlement 2019/1010 communication environnement

Le règlement sur l'alignement des obligations en matière de communication d'informations dans le domaine de la législation liée à l'environnement vient modifier divers textes européens et demande notamment qu'un **registre** soit établi indiquant les **quantités de boues** d'épuration produites, celles livrées à l'agriculture, la **composition** et les **caractéristiques des boues**, l'adresse des destinataires et la **localisation de leur utilisation**. Le texte ne cible pas les PFAS en tant que tels mais les boues qui sont susceptibles de contenir divers micropolluants dont les PFAS [41].

2.3. Belgique

2.3.1 Bruxelles

Bruxelles Environnement a pris l'initiative de rédiger et de publier un [Code de Bonnes Pratiques](#) pour l'étude et le traitement des PFAS dans le sol et l'eau souterraine, destiné aux experts en pollution du sol. Il est en vigueur depuis le 24/01/2022 et établit les modalités pratiques d'investigation des PFAS lors des études de sol. Le contenu de ce code est en évolution continue et peut être adapté en fonction des nouvelles connaissances acquises. Ce code permet à Bruxelles Environnement de veiller à ce que les PFAS soient intégrés dans les études de sols ainsi que dans la gestion des pollutions éventuellement rencontrées [42].

Ce Code de Bonnes pratiques prévoit de respecter la procédure CMA/3/D appliquée en Flandre pour l'analyse des PFAS dans les sols et de mesurer les PFAS quantifiables listés dans cette procédure. Pour l'analyse des PFAS dans les eaux souterraines, c'est la procédure WAC/IV/A/025 appliquée en Flandre qui doit être respectée. Dans les deux cas, les analyses doivent être réalisées par un laboratoire agréé en Région de Bruxelles-Capitale [43].

Des « normes d'intervention » et des « normes d'assainissement » sont définies à la fois pour le sol et pour les eaux souterraines. Les normes d'intervention sont des concentrations en polluants du sol et de l'eau souterraine au-delà desquelles les risques pour la santé humaine et/ou pour l'environnement sont considérés comme non négligeables et un traitement de la pollution est requis. Concrètement, ce sont des normes au-delà desquelles une étude détaillée doit être effectuée. Les normes d'assainissement sont des concentrations en polluants du sol et de l'eau souterraine sous lesquelles les risques pour la santé humaine et pour l'environnement sont considérés comme nuls, et qui permettent au sol de remplir toutes les fonctions. Concrètement, ce sont des normes au-delà desquelles une étude détaillée doit être effectuée lorsqu'un sol respectait (ou était censé respecter) les normes d'assainissement et ce sont également ces normes qui doivent être atteintes en cas d'assainissement.

Partie fixe du sol (µg/kg matière sèche)			
Classe de sensibilité	Zone particulière	Zone d'habitat	Zone industrielle
PFOA	2,5	7,9	303
PFOS	3,8	4,9	268
Σ PFAS TOTAUX SOL (1)	8	8	8

(1) On entend par **PFAS TOTAUX SOL** tous les **PFAS QUANTIFIABLES** par la méthode d'analyse CMA/3/D PFOS et PFOA y inclus

	Partie fixe du sol ($\mu\text{g}/\text{kg}$ matière sèche)
PFOA	2
PFOS	3
Autres PFAS (2)	1 (3)

- (2) On entend par **Autres PFAS** tous les **PFAS QUANTIFIABLES** par la méthode d'analyse CMA/3/D, à l'exclusion du PFOA et du PFOS
 (3) La norme vaut pour chaque composé PFAS individuellement

Eau souterraine ($\mu\text{g}/\text{l}$)	
Σ 20 PFAS (4)	0,1
Σ PFAS TOTAUX EAU (5)	0,5

- (4) On entend par **20 PFAS** les 20 composés PFAS repris à l'annexe III, partie B, point 3, de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine
 (5) On entend par **PFAS TOTAUX EAU** tous les **PFAS QUANTIFIABLES** par la méthode d'analyse WAC/IV/A/025

	Eau souterraine ($\mu\text{g}/\text{l}$)
PFOA	0,02 (6)
PFOS	0,02 (6)
Autres PFAS (7)	0,02 (8)

- (6) La norme vise la forme linéaire telle que stipulée par la méthode d'analyse WAC/IV/A/25, et pas la somme linéaire + ramifiée (si la somme linéaire + ramifiée dépasse la limite de quantification, telle que stipulée par la méthode d'analyse WAC/IV/A/25, la cause de ce dépassement devra être expliquée en tenant compte des concentrations analysées des formes linéaires et il est nécessaire de se prononcer sur les suites éventuelles à y donner).
 (7) On entend par **Autres PFAS** tous les **PFAS QUANTIFIABLES** par la méthode d'analyse WAC/IV/A/025 pour l'eau à l'exclusion du PFOA et du PFOS
 (8) La norme vaut pour chaque composé PFAS individuellement

2.3.2 Flandre

Le cadre normatif sur les PFAS en Flandre comprend des valeurs pour les sols et les différents types d'eaux [44].

2.3.2.1 Eau de boisson

La directive européenne sur l'eau potable est le cadre juridique qui régit les exigences en matière de qualité de l'eau potable et permet d'identifier les risques pour la santé. La directive européenne sur l'eau potable 2020 comprend deux valeurs paramétriques pour les PFAS :

- Somme des 20 PFAS : 0,1 µg/L
- Somme de tous les PFAS : 0,5 µg/L

La Flandre utilise les deux valeurs de paramètres comme normes légales.

En outre, une valeur cible de 4 ng/L pour la somme des PFOA, PFOS, PFNA et PFHxS (EFSA-4) est d'application. Cette valeur cible doit être atteinte au plus tard 5 ans après l'adoption du décret sur l'eau potable (20/01/2023), soit le 20/01/2028.

2.3.2.2 *Eaux de surface*

Les normes de qualité environnementales (NQE) issues de la directives NQE (voir partie 2.2.7) sont appliquées pour le PFOS, à savoir [35]:

- NQE dans les eaux de surface intérieures, de 0,65 ng/L en moyenne annuelle (MA)
- et 36 µg/L en concentration maximale admissible (CMA).

2.3.2.3 *Eaux usées industrielles au point de rejet*

Lors du rejet des eaux usées, les composés PFAS doivent être inclus dans la demande de permis dès que les limites de déclaration (annexe 4.2.5.2. art.4 § 1. de VLAREM II) [45] sont dépassées.

Plus précisément, pour les rejets existants dont les concentrations sont supérieures à 20 (respectivement 50) ng/L, des mesures devront être prises pour que les concentrations des différents PFAS restent inférieures à 20 ng/L ou 50 ng/L, respectivement, ou ces substances devront être incluses dans la demande d'autorisation.

Une modification du titre II du VLAREM est en cours. Elle a été approuvée en principe par le gouvernement flamand le 16/09/2022 et n'est pas encore entrée en vigueur à ce jour. Il prévoit notamment une période de transition pour les rejets existants lorsque des normes nouvelles ou actualisées deviennent applicables, afin que les opérateurs disposent de suffisamment de temps pour se conformer à cette obligation d'autorisation.

2.3.2.4 *Eaux de baignade*

Il n'existe pas de normes (internationales) pour les PFAS dans les eaux de baignade et de loisirs. C'est pourquoi le ministère de la Santé a calculé des valeurs préliminaires d'évaluation sanitaire pour les eaux de baignade pour la somme de certains composés PFAS. Le calcul aboutit aux valeurs d'évaluation sanitaire suivantes (arrondies) pour les PFAS dans les eaux de baignade.

Ces valeurs d'essai indiquent quelle valeur la somme des concentrations de quatre composés PFAS (PFOS, PFOA, PFNA et PFHxS) dans les eaux de surface est autorisée lorsque des personnes s'y baignent régulièrement :

- Enfant (3-6 ans) : 200 ng/L
- Adulte : 1000 ng/L

Si ces valeurs sont dépassées, il est conseillé de ne pas se baigner dans cette eau. Pour les activités récréatives (kayak, planche à voile, voile, etc.), une analyse de risque spécifique doit être effectuée. En effet, l'utilisation d'eaux libres pour la natation ou les loisirs implique un profil d'utilisation différent.

2.3.2.5 Sol

Le cadre opérationnel temporaire pour les matériaux de sol contenant des PFAS a été publié au Moniteur belge le 10 octobre 2023 [46]. Il réglemente le cadre du terrassement, par exemple dans la préparation et l'évaluation des rapports techniques et des demandes de permis de terrassement. Le même arrêté comprend également un cadre temporaire pour l'évaluation du critère d'assainissement "indication claire d'une pollution grave du sol" dans le contexte des études de sol.

Le décret introduit un cadre d'action temporaire autonome spécifique à la contamination par les PFAS, qui reste un paramètre non normalisé. La date d'entrée en vigueur est fixée au 1er septembre 2024.

Le cadre d'action comprend des dispositions concernant :

- Valeurs cibles pour la partie fixe de la terre (1,5 µg/kg MS pour le PFOS et 1 µg/kg MS pour le PFOA)
- Les dispositions relatives à l'utilisation des matériaux de sol contenant des PFAS (ex. utilisation libre, utilisation de sols de construction, etc.) ;
- Les valeurs d'essai pour les sols contenant des PFAS (pour l'évaluation du critère d'assainissement "indication claire d'une contamination grave du sol" dans le cadre des études de sol) :

Tableau 10 : valeurs d'essai pour les sols contenant des PFAS - Flandres

Utilisation du sol	1-2	3	4	5
PFOS (µg/kg)	3,8	4,9	110	268
PFOA (µg/kg)	2,5	7,9	632	303

Une valeur d'essai est attribuée à chaque type d'utilisation. Les types 1 et 2 sont agriculture et nature, le type 3 est habitation, 4 est récréation et 5 est industrie.

Le cadre provisoire inclut également le critère d'assainissement "indication claire d'une contamination grave du sol" pour la section sur les eaux souterraines dans le contexte des études de sol.

La valeur d'essai s'applique :

- 0,1 µg/L ou 100 ng/L pour la somme des 20 PFAS et,
- 0,5 µg/L ou 500 ng/L pour la somme de tous les PFAS.

Pour l'instant, les normes d'assainissement des sols et des eaux souterraines pour les différents PFAS ne sont pas appliquées.

2.3.2.6 Déchets utilisés comme amendements de sol ou engrais (y inclus les boues)

Une valeur d'essai de 15 µg/kg MS est utilisée pour la somme des 20 PFAS inclus dans la norme européenne de 0,1 µg/L pour l'eau potable. Par conséquent, le PFOS, le PFOA et les composés PFAS à chaîne courte les plus fréquemment détectés sont inclus dans l'évaluation.

En ce qui concerne l'échantillonnage et l'analyse dans les sols, la Flandre dispose d'un compendium d'échantillonnage et d'analyse (compendium voor de monsterneming en analyse, CMA) [47] et d'un compendium d'échantillonnage, de mesure et d'analyse de l'eau (compendium voor de monsterneming, meting en analyse van water, WAC) [48] qui comprennent des dispositions relatives aux PFAS.

Le CMA/3/D [49] concerne les PFAS dans le sol et les sédiments et prévoit le suivi de 36 PFAS quantifiables et 6 PFAS « indicatifs » (PFAS dont la mesure est moins fiable en raison d'une récupération insuffisante, d'une perte par adsorption et/ou d'autres interférences et qui ne peuvent donc être mesurés et rapportés qu'à titre indicatif).

Tableau 11 : Liste des PFAS quantifiables dans les sols et les sédiments - Flandre

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluoro-n-butaanzuur	PFBA	375-22-4
perfluor-n-pentaanzuur	PFPeA	2706-90-3
perfluor-n-hexaanzuur	PFHxA	307-24-4
perfluor-n-heptaanzuur	PFHpA	375-85-9
perfluor-n-octaanzuur	PFOA	335-67-1
perfluor-n-nonaanzuur	PFNA	375-95-1
perfluor-n-decaanzuur	PFDA	335-76-2
perfluor-n-undecaanzuur	PFUnDA	2058-94-8
perfluor-n-dodecaanzuur	PFDoDA	307-55-1
perfluor-n-tridecaanzuur	PFTTrDA	72629-94-8
perfluor-n-tetradecaanzuur	PFTeDA	376-06-7
perfluor-n-hexadecaanzuur	PFHxDA	67905-19-5
perfluor-n-butaansulfonzuur	PFBS	375-73-5
Perfluor-n-pentaansulfonzuur	PFPeS	2706-91-4
perfluor-n-hexaansulfonzuur	PFHxS	355-46-4
perfluor-n-heptaansulfonzuur	PFHpS	375-92-8
perfluor-n-octaansulfonzuur	PFOS	1763-23-1
perfluor-n-nonaansulfonzuur	PFNS	68259-12-1
perfluor-n-decaansulfonzuur	PFDS	335-77-3
perfluor-n-dodecaansulfonzuur	PFDoDS	79780-39-5
perfluor-n-octaansulfonamide	PFOSA	754-91-6
N-methylperfluor-n-octaansulfonamide	MePFOSA	31506-32-8
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamide	EtPFOSA	4151-50-2
N-methylperfluor-n-octaansulfonamidoazijnzuur	MePFOSAA	2355-31-9
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamidoazijnzuur	EtPFOSAA	2991-50-6
4:2 fluortelomeersulfonzuur	4:2 FTS	757124-72-4
6:2 fluortelomeersulfonzuur	6:2 FTS	27619-97-2
8:2 fluortelomeersulfonzuur	8:2 FTS	39108-34-4
8:2 fluortelomeerfosfaat diester	8:2 diPAP	678-41-1

10:2 fluortelomeersulfonzuur	10:2 FTS	120226-60-0
perfluor-2-propoxypropaanzuur	HFPO-DA	13252-13-6
4,8-dioxa-3H-perfluornonaanzuur	DONA	919005-14-4
perfluor-4-ethylcyclohexaansulfonzuur	PFECHS	646-83-3
perfluor-n-butaansulfonamide	PFBSA	30334-69-1
N-methylperfluor-n-butaansulfonamide	MePFBSA	68298-12-4
perfluor-n-hexaansulfonamide	PFHxSA	41997-13-1
Totaal van lineair en vertakt PFOA	PFOAtotaal	-
Totaal van lineair en vertakt PFOS	PFOS totaal	-
Totaal van lineair en vertakt PFOSA	PFOSAtotaal	-
Totaal van lineair en vertakt MePFOSA	MePFOSAtotaal	-
Totaal van lineair en vertakt EtPFOSA	EtPFOSAtotaal	-
Totaal van lineair en vertakt PFHxS	PFHxStotaal	-

Tableau 12 : Liste des 6 PFAS indicateurs dans les sols et les sédiments - Flandre

Tabel 2: indicatieve PFAS

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluor-n-octadecaanzuur	PFODA	16517-11-6
6:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2 diPAP	57677-95-9
6:2/8:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2/8:2 diPAP	943913-15-3
N-methylperfluor-n-butaansulfonamide azijnzuur	MePFBSAA	159381-10-9
perfluor-n-undecaansulfonzuur	PFUnDS	749786-16-1
perfluor-n-tridecaansulfonzuur	PFTTrDS	791563-89-8

Le CMA/3/O concerne les PFAS dans les amendements pour sols. La méthode peut également être utilisée pour la détermination des PFAS dans les déchets organiques. La méthode repose sur la quantification de 26 composés (Tableau 13). 16 autres composés peuvent également être déterminés de façon indicative (les niveaux obtenus n'étant pas suffisamment fiables pour une quantification du fait d'une récupération insuffisante, d'une perte par adsorption ou d'interférences possibles).

Tableau 13 : Liste des 26 PFAS quantifiables dans les déchets organiques (dont les boues) - Flandre

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluor-n-butaanzuur	PFBA	375-22-4
perfluor-n-pentaanzuur	PFPeA	2706-90-3
perfluor-n-hexaanzuur	PFHxA	307-24-4
perfluor-n-heptaanzuur	PFHpA	375-85-9
perfluor-n-octaanzuur	PFOA	335-67-1
perfluor-n-nonaanzuur	PFNA	375-95-1
perfluor-n-decaanzuur	PFDA	335-76-2
perfluor-n-undecaanzuur	PFUnDA	2058-94-8
perfluor-n-dodecaanzuur	PFDoDA	307-55-1
perfluor-n-tridecaanzuur	PFTTrDA	72629-94-8
perfluor-n-tetradecaanzuur	PFTTeDA	376-06-7
perfluor-n-hexadecaanzuur	PFHxDA	67905-19-5
perfluor-n-butaansulfonzuur	PFBS	375-73-5
perfluor-n-pentaansulfonzuur	PFPeS	2706-91-4
perfluor-n-hexaansulfonzuur	PFHxS	355-46-4
perfluor-n-heptaansulfonzuur	PFHpS	375-92-8
perfluor-n-octaansulfonzuur	PFOS	1763-23-1
perfluor-n-nonaansulfonzuur	PFNS	68259-12-1
perfluor-n-octaansulfonamide	PFOSA	754-91-6
N-methylperfluor-n-octaansulfonamide	MePFOSA	31506-32-8
4:2 fluortelomeersulfonzuur	4:2 FTS	757124-72-4
6:2 fluortelomeersulfonzuur	6:2 FTS	27619-97-2
8:2 fluortelomeersulfonzuur	8:2 FTS	39108-34-4
4,8-dioxa-3H-perfluornonaanzuur	DONA	919005-14-4
perfluor-4-ethylcyclohexaansulfonzuur	PFECHS	646-83-3
perfluor-n-hexaansulfonamide	PFHxSA	41997-13-1

Tableau 14 : Liste des 16 PFAS indicateurs dans les déchets organiques (dont les boues) - Flandre

Tabel 2: indicatieve PFAS

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluor-n-octadecaanzuur	PFODA	16517-11-6
perfluor-n-decaansulfonzuur	PFDS	335-77-3
perfluor-n-dodecaansulfonzuur	PFDoDS	79780-39-5
10:2 fluortelomeersulfonzuur	10:2 FTS	120226-60-0
perfluor-2-propoxypropaanzuur	HFPO-DA	13252-13-6
6:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2 diPAP	57677-95-9
8:2 fluortelomeerfosfaat diester	8:2 diPAP	678-41-1
6:2/8:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2/8:2 diPAP	943913-15-3
perfluor-n-butaansulfonamide	PFBSA	30334-69-1
N-methylperfluor-n-butaansulfonamide	MePFBSA	68298-12-4
N-methylperfluor-n-butaansulfonamide azijnzuur	MePFBSAA	159381-10-9
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamide	EtPFOSA	4151-50-2
N-methylperfluor-n- octaansulfonamidoazijnzuur	MePFOSAA	2355-31-9
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamidoazijnzuur	EtPFOSAA	2991-50-6
perfluor-n-undecaansulfonzuur	PFUnDS	749786-16-1
perfluor-n-tridecaansulfonzuur	PFTrDS	791563-89-8

Pour l'eau, le WAC/IV/A/025 [50] concerne la détermination des PFAS dans l'eau par LC-MS/MS (eaux de boisson, eaux souterraines, eaux de surface et eaux usées) et le WAC/IV/A/026 [51] concerne la détermination des PFAS à chaîne courte dans l'eau par LC-MS/MS.

Le WAC/IV/A/026 vise à quantifier les composés listés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Liste des PFAS du WAC/IV/A/026

PFAS	Afkorting	CAS nr
trifluorazijnzuur	TFA	76-05-1
perfluor-n-propaanzuur	PFPrA	422-64-0
perfluor-n-propaansulfonzuur	PFPrS	423-41-6
trifluor-n-methaansulfonzuur	TFMS	1493-13-6
pentafluor-n-ethaansulfonzuur	PFEtS	354-88-1
2,3,3,3-tetrafluor-n-propaanzuur	2,3,3,3-TeFPrA	359-49-9
2,2,3,3-tetrafluor-n-propaanzuur	2,2,3,3-TeFPrA	756-09-2

Les composés visés par le WAC/IV/A/025 sont repris dans le Tableau 16.

Tabel 1: kwantitatieve PFAS

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluor-n-butaanzuur	PFBA	375-22-4
perfluor-n-pentaanzuur	PFPeA	2706-90-3
perfluor-n-hexaanzuur	PFHxA	307-24-4
perfluor-n-heptaanzuur	PFHpA	375-85-9
perfluor-n-octaanzuur	PFOA	335-67-1
perfluor-n-nonaanzuur	PFNA	375-95-1
perfluor-n-decaanzuur	PFDA	335-76-2
perfluor-n-undecaanzuur	PFUnDA	2058-94-8
perfluor-n-dodecaanzuur	PFDoDA	307-55-1
perfluor-n-tetradecaanzuur	PFTeDA	376-06-7
perfluor-n-hexadecaanzuur	PFHxDA	67905-19-5
perfluor-n-butaansulfonzuur	PFBS	375-73-5
perfluor-n-pentaansulfonzuur	PFPeS	2706-91-4
perfluor-n-hexaansulfonzuur	PFHxS	355-46-4
perfluor-n-heptaansulfonzuur	PFHpS	375-92-8
perfluor-n-octaansulfonzuur	PFOS	1763-23-1
perfluor-n-nonaansulfonzuur	PFNS	68259-12-1
perfluor-n-decaansulfonzuur	PFDS	335-77-3
4:2 fluortelomeersulfonzuur	4:2 FTS	757124-72-4
6:2 fluortelomeersulfonzuur*	6:2 FTS	27619-97-2
8:2 fluortelomeersulfonzuur	8:2 FTS	39108-34-4
perfluor-n-octaansulfonamide	PFOSA	754-91-6
N-methylperfluor-n-octaansulfonamide	MePFOSA	31506-32-8
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamide	EtPFOSA	4151-50-2
N-methylperfluor-n-octaansulfonamido-azijnzuur	MePFOSAA	2355-31-9
N-ethylperfluor-n-octaansulfonamido-azijnzuur	EtPFOSAA	2991-50-6
8:2 fluortelomeerfosfaat diester	8:2 diPAP	678-41-1
perfluor-2-propoxypropaanzuur	HFPO-DA	13252-13-6
4,8-dioxa-3H-perfluornonaanzuur	DONA	919005-14-4
perfluor-4-ethylcyclohexaansulfonzuur	PFECHS	646-83-3
perfluor-n-butaansulfonamide	PFBSA	30334-69-1
N-methylperfluor-n-butaansulfonamide	MePFBSA	68298-12-4
N-methylperfluor-n-butaansulfonylamide azijnzuur	MePFBSAA	159381-10-9
perfluor-n-hexaansulfonamide	PFHxSA	41997-13-1

Tabel 2: indicatieve PFAS

PFAS	Afkorting	CAS nr
perfluor-n-tridecaanzuur	PFTrDA	72629-94-8
perfluor-n-octadecaanzuur	PFODA	16517-11-6
perfluor-n-dodecaansulfonzuur	PFDoDS	79780-39-5
perfluor-n-undecaansulfonzuur	PFUnDS	749786-16-1
perfluor-n-tridecaansulfonzuur	PFTrDS	791563-89-8
10:2 fluortelomeersulfonzuur	10:2 FTS	120226-60-0
6:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2 diPAP	57677-95-9
6:2/8:2 fluortelomeerfosfaat diester	6:2/8:2 diPAP	943913-15-3
6:2 fluortelomeersulfonzuur*	6:2 FTS	27619-97-2

2.3.3 Wallonie

A l'heure actuelle, comme la plupart des pays européens, la Wallonie ne dispose pas de réglementation spécifique relative au suivi et au traitement des PFAS présents dans les eaux et les boues de stations d'épuration. Cependant, les actions suivantes sont mises en œuvre [52]:

Conseil Scientifique Indépendant (CSI) PFAS

Un groupe d'experts scientifiques (toxicologues, chimistes, etc.) a été constitué le 22 novembre 2023 par le Gouvernement wallon, sur la base du domaine d'expertise et de la connaissance du sujet PFAS de chaque membre.

Ce Conseil Scientifique est chargé de conseiller le Gouvernement wallon et d'examiner toutes les conséquences sur la santé liées à la présence de PFAS dans l'environnement.

Ses premières missions reprennent notamment des aspects environnementaux :

- Préciser les différents vecteurs de diffusion possibles des PFAS présents dans l'environnement ;
- Déterminer plus spécifiquement le rôle de l'eau potable dans cette diffusion et les impacts santé potentiels de celle-ci ;
- Évaluer le besoin, le cas échéant, de réviser les normes de concentration des PFAS dans l'environnement, y compris les seuils de vigilance relatifs à la concentration de PFAS dans l'eau potable ;
- Formuler des recommandations d'action au Gouvernement en matière de lutte contre les PFAS, complémentairement aux actions déjà prises ou planifiées par le Gouvernement.

Lignes directrices pour les PFAS dans les études décret sol

Le Département de l'Assainissement des Sols [53] recommande d'analyser les paramètres quantitatifs prévus dans les procédures CMA/3/D (pour les sols) et WAC/IV/A/025 (pour les

eaux souterraines). Toutefois, si ces procédures ne sont pas suffisantes pour investiguer les PFAS pour toutes les catégories d'activités à risque [54] il est recommandé de procéder à des analyses complémentaires non-spécifiques (TF, TOP et/ou AOF/EOF) de façon complémentaire.

Pour les eaux souterraines, les concentrations en PFAS doivent être interprétées sur base du calcul de 2 sommes :

- Somme des 20 PFAS de la directive eau potable : 100 ng/L
- Somme des PFAS quantifiables : 500 ng/L

Pour le sol, aucune valeur limite n'est proposée actuellement pour la somme des PFAS mais des valeurs limites spécifiques ont été définies pour le PFOS (0,98 µg/kg MS), le PFOA (0,51 µg/kg MS) et le PFDA (0,057 µg/kg MS).

Permis d'environnement

Récemment, la Direction des Eaux de surface a commencé à intégrer une obligation de suivi des PFAS dans les rejets de certains établissements.

2.4. Pays européens

Pour la plupart des pays européens membres de l'union, la définition des normes et règlements se fait au niveau européen puis ces règles sont transposées au niveau national. Néanmoins certains pays vont plus loin ou vont plus vite que les instances européennes pour définir des restrictions sur les PFAS.

2.4.1 Allemagne

L'Allemagne joue un rôle moteur en vue de l'interdiction des PFAS en Europe. Au niveau national, conformément à la directive EDCH, l'Allemagne appliquera une valeur limite de 0,1 µg/L pour la somme de PFAS à partir de 2026. A partir, de 2028 la somme des PFHxS, PFOS, PFOA et PFNA ne pourra dépasser la limite de 0,02 µg/L

L'ordonnance sur les boues d'épuration (Klärschlammverordnung - AbfklärV) de septembre 2017 (dernière modification en juin 2020) fixe indirectement une valeur limite pour les PFAS pour la valorisation des boues d'épuration dans le sol en faisant référence à l'ordonnance sur les engrais (Düngemittelverordnung - DüMV) de décembre 2012 (dernière modification en octobre 2019). Cette dernière, fixe **une valeur limite de 100 µg/kg PFOS + PFOA tant pour les matières premières des engrais que pour les engrais eux-mêmes** ; lorsque la concentration dépasse 50 µg/kg, cela doit être indiqué sur l'étiquette. Au-delà de la valeur maximale, les boues doivent subir un traitement thermique, c'est-à-dire, être incinérées [55].

Néanmoins, la valeur de 100 µg/kg PFOS + PFOA dans les boues est actuellement considérée comme trop élevée car cette valeur ne prend pas en compte d'autres PFAS et peut entraîner des dépassements des **valeurs de « non-signifiante »** dans les eaux souterraines listées dans le tableau 17 ci-après :

Nom	Sigle	N°CAS	Valeur guide (µg/L)
Acide perfluorodecanoïque	PFDA	335-76-2	10
Acide perfluoro-n-hexanoïque	PFHxA	307-24-4	6
Acide perfluoro-octanoïque	PFOA	335-67-1	0,1
Acide perfluorooctanesulfonique	PFOS	1763-23-1	0,1
Acide perfluorononanoïque	PFNA	375-95-1	0,06
Acide perfluorobutane sulfonique	PFBS	375-73-5	6
Acide perfluorohexanesulfonique	PFHxS	355-46-4	0,1

La loi fédérale sur l'eau Wasserhaushaltsgesetz - WHG stipule que là où les eaux usées sont rejetées, la nocivité des contaminants doit être minimisée en utilisant la meilleure technologie disponible [55]. À ce jour, aucune valeur limite sectorielle n'a été définie pour les PFAS et la « meilleure technologie disponible » n'a pas été établie.

Les règles spécifiques aux substances sont définies dans les exigences générales de la partie B des annexes du décret allemand sur les eaux usées Abwasserordnung (AbwV) (par exemple, évitement ou minimisation de certaines substances entrantes).

Lors de la définition des limites de rejet dans les permis, il est recommandé de se baser sur la NQE mesurée à un point représentatif de la masse d'eau superficielle (et non pas au point de rejet) – afin de prendre en compte les conditions du milieu récepteur (débit et autres rejets). A défaut de NQE, la PNEC peut être utilisée mais cette valeur présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte le caractère bio-accumulatif des PFAS.

A noter, que Le Land de Rhénanie du Nord-Westphalie a fixé des normes de rejet dans les eaux superficielles à 300 ng/L pour la somme de PFOS et de PFOA et de 1000 ng/L pour la somme de tous les PFAS.

De nouvelles règles sont en préparation afin de réviser l'ordonnance sur les boues d'épuration (abaissement des seuils et ajout de substances) et pour définir des valeurs limites dans les sols.

2.4.2 Autriche

Conformément à la DCE, l'Autriche fixe actuellement la concentration maximale admissible de PFOS dans les eaux de surface à 36 µg/l, et la NQE moyenne annuelle à 0,00065 µg/l [56].

Depuis 2010, une **valeur maximale de 100 µg/kg PFOS + PFOA a été fixée et ajoutée à l'Ordonnance de 2004 sur les engrais** dont les boues d'épuration (Ordonnance de 2004 sur les engrais, Journal officiel fédéral II n° 100/2004).

Le plan fédéral de gestion des déchets de 2023 fixe sous certaines conditions, une valeur limite de 0,002 mg/kg MS pour la teneur totale en PFAS (somme des 20 PFAS de la directive EDCH)

pour les sols (ou déblais) des classes de qualité A1ⁱ¹³, A2-G¹⁴, A2¹⁵ et de la classe de qualité BA¹⁶. La valeur est fixée à 0,001 mg/kg MS pour l'éluat. Des enquêtes pour déterminer la source doivent être menées en cas de suspicion de contamination.

L'Ordonnance sur le registre des émissions impose également une **obligation de surveillance du PFOS** (avec une **limite de quantification de 0,001 µg/L**) dans les effluents des principaux émetteurs tels que les usines de traitement de surface, les usines de traitement des déchets et les décharges. Cette obligation **concerne également les stations d'épuration urbaines de plus 10 000 EH depuis 2023**.

2.4.3 Danemark

Le Danemark est l'un des pays avec **les seuils les plus bas au monde** et a été l'un des premiers à définir des seuils maximums dans l'eau et dans les sols. Depuis juin 2021, l'Agence danoise de protection de l'environnement a fixé la limite maximale à de **2 ng/L de la somme totale de PFOA, PFOS, PFNA et PFHxS dans l'eau potable**. La somme totale de 12 PFAS : PFBS, PFHxS, PFOS, PFOSA, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA est également limité à **0,4 mg/kg de matière sèche dans les sols**.

Des valeurs limites pour les PFAS dans les boues d'épuration à usage agricole ont été définies en octobre 2021. La réglementation fixe les limites suivantes [57]:

- Somme de 4 PFAS (PFOA, PFOS, PFNA et PFHxS) maximum : **10 µg/kg** de matière sèche.
- Somme de 22 PFAS (PFBS, PFPS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnS, PFDoS, PFTrS, PFOSA, 6:2 FTS, PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA) maximum : **400 µg/kg** de matière sèche.

Le Danemark est également l'un des pays à l'origine de la demande de l'interdiction des PFAS en Europe en cours d'évaluation par l'ECHA [21].

2.4.4 France

Actuellement, il existe peu de règles spécifiques relatives au PFAS en France qui soient différentes des valeurs définies par la Directive cadre sur l'eau pour les PFOS et de la Directive EDCH sur la liste de 20 PFAS dans l'eau potable. A noter, que depuis le 17 août 2022, pour certaines installations de traitement de déchets relevant du régime de l'autorisation et de la directive relative aux émissions industrielles (dite « IED »), une **surveillance semestrielle du PFOS et du PFOA** doit être réalisée au niveau des effluents (arrêté du 17 décembre 2019) et que **depuis le 1er janvier 2023, la réglementation limite la présence de PFOS à 25 µg/L dans les rejets aqueux des établissements** [13].

Les règles applicables en France sont en évolution. L'assemblée nationale a adopté en 1ère lecture le 4 avril 2024 une loi afin de "protéger la population des risques liés aux substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées" [58]. Le texte prévoit notamment :

¹³ Utilisation agricole

¹⁴ terrassements dans les eaux souterraines et immédiatement au-dessus de la limite des eaux souterraines

¹⁵ terrassements

¹⁶ déblais avec qualité de décharge

- **L'interdiction au 1er janvier 2026 de la fabrication, l'importation, l'exportation et la mise sur le marché à titre onéreux ou gratuit des produits cosmétiques, du fart et des produits textiles contenant des PFAS** (sauf ceux servant d'équipement de protection qui seront interdits en 2030),
- **La publication annuelle de la cartographie** des sites ayant pu ou émettant des PFAS,
- **La définition de zones de risque de contamination** aux PFAS pouvant conduire à des mesures spécifiques préconisées par les Agences Régionales de Santé (ARS),
- Une obligation pour la France à se doter d'une trajectoire nationale de réduction progressive des rejets aqueux de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées des installations industrielles, de manière à tendre vers la fin de ces rejets dans un délai de cinq ans à compter de la promulgation de la loi,
- La publication des résultats d'analyse sur les PFAS issus de l'application de la directive EDCH,
- La **perception d'une redevance de 100 € pour 100 g de PFAS rejeté dans le milieu naturel ou dans un réseau d'assainissement à partir de 100 g d'émission par an** (ce qui implique un suivi des émissions dans les rejets aqueux).

Le plan d'actions interministériel sur les PFAS a également été actualisé le 20 avril 2024 [59]. Ce plan de 27 actions remplace celui de janvier 2023. Le plan préconise notamment la normalisation de méthode de prélèvement et d'analyse des PFAS, La définition de seuil de contamination/exposition aux PFAS, **le renforcement de la surveillance des PFAS notamment dans les stations d'épuration de plus de 10 000 EH** (soit environ 1 300 stations) via le programme RSDE, dans les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) (soit environ 4 000 sites qui doivent faire l'objet de 3 prélèvements), dans l'eau potable pour une trentaine de PFAS (PFAS de la directive EDCH + quelques ultra-short PFAS) et dans le milieu naturel (notamment le PFOA, le PFHxA, le PFDA et le PFHxS).

Dans l'Arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation [60], il est indiqué que **l'exploitant d'une installation doit réaliser une campagne d'identification et d'analyse des substances PFAS sur chaque point de rejets aqueux de l'établissement**, à l'exception des points de rejet des eaux pluviales non souillées. Les émissaires d'eaux de ruissellement des zones où ont été utilisées des mousses d'extinction d'incendie en quantité significative sont également concernés par cette campagne, ainsi que ceux ayant des eaux contaminées par des PFAS d'une manière plus générale. Cette campagne porte sur :

1. **L'estimation de la quantité totale de substances PFAS présente**, en équivalent fluorure, par l'utilisation de la méthode indiciaire par adsorption du fluor organique (AOF) ;
2. **L'analyse de chacune des substances listées dans le Tableau 18**

Tableau 18 : Liste des substances à suivre de l'arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation

Nom	Abréviation	No CAS
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/PFUnA	2058-94-8
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA/PFDoA	307-55-1
Acide perfluorotridécanoïque	PFTrDA/PFTrA	72629-94-8
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 perfluoroundécane sulfonique	PFUnDS	749786-16-1
Acide perfluorododécane sulfonique	PFDoDS	79780-39-5
Acide perfluorotridécane sulfonique	PFTrDS	791563-89-8

La recherche et l'analyse de toute autre substance PFAS, mentionnée dans la liste établie par l'exploitant selon les dispositions prévues à l'article 2, techniquement quantifiable selon les dispositions prévues à l'article 4, non comprise dans le tableau ci-dessus et susceptible d'être ou d'avoir été présente dans les rejets aqueux de son établissement. Sont particulièrement concernées les substances listées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Liste complémentaire des substances de l'arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation

Nom	Abréviation	No CAS
Acide perfluorotetradécanoïque	PFTeA ; PFTeDA	376-06-7
Acide perfluorohexadécanoïque	PFHxDA	67905-19-5
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	16517-11-6
Ammonium perfluoro (2-méthyl-3-oxahexanoate)	HFPO-DA (Gen X)	13252-13-6 (62037-80-3)
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid	DONA ; ADONA	919005-14-4 (958445-44-8)
Perfluoro([5-méthoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid	C6O4	1190931-27-1 (1190931-41-9)
2-perfluorohexyl ethanol (6:2)	6:2 FTOH ; FHET	647-42-7
2-perfluorooctyl ethanol (8:2)	8:2 FTOH ; FOET	678-39-7

Pour l'utilisation de la méthode indiciaire (AOF) mentionnée à l'alinéa 1 de l'article 3, une limite de quantification de 2 µg/L doit être respectée. Pour chacune des substances PFAS mentionnées à l'alinéa 2 et à l'alinéa 3 de l'article 3, une limite de quantification de 100 ng/L doit être respectée. Si une substance PFAS n'est pas quantifiée ou quantifiée à une concentration inférieure à 100 ng/L, la mention « non quantifiée » est précisée.

2.4.5 Norvège

Les mesures réglementaires en Norvège comprennent la surveillance et le nettoyage des sols pollués par les PFAS sur les sites d'exercices d'incendie des aéroports, les permis de rejet des usines de traitement des déchets pour certains PFAS, l'analyse des PFAS dans les produits de consommation et une interdiction nationale de la fabrication, de la production, de l'importation et mise sur le marché de produits de consommation contenant du PFOA.

La Norvège, a publié en 2019 des valeurs limites pour plusieurs polluants organiques dans les fertilisants dont une **somme de 12 PFAS¹⁷ à 100 µg/kg MS** et une valeur maximale de **40 µg/kg MS pour la somme de PFOS et PFOA** [57].

Un récent rapport du Conseil nordique a démontré que les précurseurs des PFCA primaires mais aussi des PFSA, dominaient la teneur en PFAS des boues d'épuration dans 12 échantillons provenant des pays nordiques. Les deux échantillons norvégiens ont montré que le PFOA et le PFOS étaient présents dans une plage de concentrations de 1 et 3 µg/kg de matière sèche. Le total de PFAS était de 64 à 86 µg/kg de matière sèche. Les PFCA et PFSA ont respectivement contribué à environ 75 et 10 %, de la teneur en PFAS. Une adaptation de la réglementation afin de prendre en compte ces paramètres est donc possible.

2.4.6 Suède

En Suède, les valeurs directrices élaborées prennent en compte les risques posés par une zone contaminée pour les personnes séjournant dans la zone (risques pour la santé), ainsi que les risques que la pollution implique pour l'environnement au sein de la zone (environnement du sol) et en aval de la zone (eaux souterraines et eaux de surface) [61].

La valeur guide pour la somme de PFOA, PFOS, PFNA et PFHxS dans les terres destinées à une « utilisation sensible » (KM: Känslig Markanvändning¹⁸) est de 0,25 µg/kg MS et de 1.2 µg/kg MS pour une utilisation « moins sensible » (MKM : Mindre Känslig Markanvändning¹⁹) [62].

¹⁷ Priority list Miljødirektoratet, PFAS 12: PFOA, PFOS, PFHxA, PFHxS, PFBS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFTrDA, PFTeDA, GenX

¹⁸ L'utilisation sensible des terres (KM) signifie que la qualité du sol ne limite pas l'utilisation des terres. Tous les groupes de personnes, y compris les enfants, les adultes et les personnes âgées, peuvent séjourner dans la zone toute leur vie. La plupart des systèmes écologiques du sol sont protégés, tout comme les eaux souterraines et les eaux de surface. L'occupation du sol sensible correspond généralement à des logements résidentiels et à des parcs.

¹⁹ L'utilisation des terres moins sensible (MKM) est celle où la qualité du sol limite le choix de l'utilisation des terres, par exemple aux industries, aux bureaux ou aux routes. Les groupes de personnes présumés exposés sont les personnes qui travaillent sur le site ainsi que les enfants et les personnes âgées qui visitent temporairement la zone. La qualité du sol fournit les conditions nécessaires aux fonctions du sol nécessaires à une utilisation des terres moins sensible, par exemple la capacité de la végétation à croître et des animaux à

Il est également intéressant de noter que l'industrie laitière du pays a interdit l'épandage de boues d'épuration dans les fermes laitières suédoises dès 1997. Selon la politique de l'industrie laitière, les boues d'épuration ne doivent pas non plus être épandues sur des terres où sont cultivés des pâturages, de l'herbe, d'autres fourrages grossiers ou des légumes-racines destinés à l'alimentation animale.

Actuellement seules les boues ayant obtenues la certification REVAQ, peuvent être utilisées en valorisation agricole. Cette certification impose une valeur maximale de 120 µg/kg MS de PFOS.

La Suède prévoit également de s'aligner sur les valeurs limites dans l'eau potable définie par le Danemark.

2.4.7 Pays Bas

Les Pays Bas ont fixé la teneur maximale de PFOS à 0,9 µg/kg MS et à 0.8 µg/kg MS pour le PFOA dans les sols.

Il est important de noter que les Pays Bas ne pratiquent pas l'épandage agricole des boues et destinent les boues à l'incinération.

2.4.8 Suisse

Pour les PFAS dans l'eau potable, la Suisse appliquera les valeurs maximales définies par la Directive Européenne EDCH à partir de 2026.

La Suisse ne définit pas de valeur limite dans les boues d'épuration car celles-ci sont considérées comme des déchets potentiellement dangereux qui doivent être incinérées.

La Suisse a imposé dans la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) de 2016 des mesures visant à éliminer les micropolluants applicables à toutes les stations d'épuration des eaux usées. Elle oblige les stations d'épuration situées en bordure de cours d'eau pollués à installer, d'ici la fin de l'année **2035**, une étape supplémentaire d'épuration destinée à **l'élimination des micropolluants**. Néanmoins la liste des substances concernées par ces traitements ne comporte pas de PFAS [63].

A noter qu'aucune valeur de référence n'a été identifiée dans boues des stations d'épuration pour l'Irlande, L'Espagne, la Pologne, le Luxembourg, la France et l'Italie

2.5. Pays anglo-saxons

2.5.1 Royaume Uni

La Drink Water Inspectorate (DWI) a publié en 2022 de nouvelles lignes directrices pour l'évaluation des risques par un tiers pour l'eau potable. **Les compagnies de distribution d'eau potable doivent quantifier 47 PFAS** définis dans la lettre d'information 05/2021 [64]. Il est

rester temporairement sur le site. Les eaux souterraines jusqu'à une distance de 200 mètres et les eaux de surface sont protégées. Les usages les moins sensibles correspondent généralement à des usages commerciaux et industriels.

demandé que les concentrations pour chacune de ces substances dans l'eau potable soient inférieures à 0,1 µg/L.

En octobre 2023, la Royal Society of Chemistry du Royaume-Uni a demandé que les directives du DWI soient révisées afin de réduire la limite de 100 ng/L à **10 ng/L** et qu'une nouvelle limite globale de 100 ng/L pour la somme des 47 PFAS de la lettre d'information soit introduite [65]. Le principe de gestion des risques prévaut également dans la gestion des boues et sur le principe d'une assurance gérée par l'organisme « Biosolid Assurance Schema »²⁰. Cet organisme confirme (mail du 16/04/2024) qu'il n'existe **pas de valeur limite pour les teneurs de PFAS dans les boues**.

Le suivi des PFAS dans l'environnement, dans les stations d'épuration et dans les boues est réalisé dans le cadre du Chemical Investigations Programme - CIP. Les résultats du 3ème programme ont été publiés en 2023. Le rapport du CIP3 indique que [66] :

- Les PFAS sont détectés dans la plupart des eaux usées notamment le PFOS et le PFOA avec une grande variabilité de concentration. Le PFBS est également détecté dans une moindre fréquence
- Une quantification quasiment systématique du PFOS, une présence occasionnelle du PFBS et le PFOA n'a jamais été détecté dans les boues.

Dans le cadre du suivi des substances émergentes, un suivi a été réalisé en sortie de stations d'épuration sur les substances suivantes : GenX, PFBS, PFBA, PFHxA, PFHxS, PFPeA, PFHpA. Les valeurs moyennes retrouvées montrent une présence fréquente et une faible variabilité saisonnière. Cette étude montre également des taux de rendement d'épuration négatifs pour certains PFAS dans plusieurs cas. [67]

2.5.2 Etats-Unis

L'EPA a adopté le 10 avril 2024 le règlement national sur l'eau potable primaire (NPDWR). La NPDWR établit les niveaux légalement applicables, appelés niveaux maximaux de contaminants (MCL), pour six PFAS dans l'eau potable [68]. Le Tableau 20 présente les valeurs individuelles définies par la NPDWR pour les 6 PFAS concernés ainsi qu'une valeur basée sur un indice de danger de la somme des 6 PFAS.

Tableau 20 : Valeurs limites en PFAS dans l'eau potable aux Etats Unis [69]

Compound	Final MCLG	Final MCL (enforceable levels)
PFOA	Zero	4.0 ng/L
PFOS	Zero	4.0 ng/L
PFHxS	10 ng/L	10 ng/L
PFNA	10 ng/L	10 ng/L
HFPO-DA (commonly known as GenX Chemicals)	10 ng/L	10 ng/L
Mixtures containing two or more of PFHxS, PFNA, HFPO-DA, and PFBS	1 (unitless)	1 (unitless) Hazard Index

²⁰ <https://assuredbiosolids.co.uk/>

	Hazard Index	
--	-----------------	--

Pour les eaux usées et les boues d'épuration, il n'existe pour l'instant pas de règle fédérale, mais l'EPA est en train d'évaluer la possibilité de définir des limites pour les PFBA; PFBS; PFHxA; PFHxS; PFHpA; PFOA; PFOS; PFNA; PFDA; PFUnDA; PFDoDA; et HFPODA (GenX) et de renforcer le monitoring pour les FBSA; PFHpS; EtFOSE; MeFOSE; 6:2FTOH; 7:2FTOH; 8:2FTOH; 9:2FTOH; 10:2FTOH; 11:2FTOH; 12:2FTOH; 13:2FTOH; 14:2FTOH; 8:2/10:2 diPAP; 10:2 diPAP; 10:2/12:2 diPAP; 7:3 FTCA; and HFPO-DA (GenX) [70]. L'EPA évalue notamment la définition de valeur limite pour le PFOS et le PFOA et rendra un avis en décembre 2024.

A noter que la politique de l'EPA est plutôt de viser l'interdiction de l'usage des PFAS plutôt que la définition de valeurs maximales dans les boues.

Un rapport de l'“Environmental Council of the States (ECOS)”[71], recense également la liste des mesures et normes relatives aux boues d'épuration prises par les états :

- Le Maine est actuellement le seul État à interdire l'épandage de boues sur les terres sauf exception. De plus, le Maine effectue une campagne de mesure de PFAS sur les parcelles où ont été épandues des boues, un échantillonnage des effluents des STEP à toutes les étapes du traitement et des échantillons de lixiviats dans les décharges. Le chapitre 418 des règles de gestion des déchets solides du Maine (2018) détaille la manière dont les déchets solides peuvent être valorisés. L'annexe A de ce document répertorie les niveaux de dépistage pour 165 contaminants présents dans les déchets solides, avec les valeurs dérivées à l'aide des protocoles standard d'évaluation des risques de l'US EPA. Pour les PFAS, les niveaux de dépistage sont basés sur la voie de lessivage vers les eaux souterraines et sont fixés à :
 - Acide perfluorobutane sulfonique (PFBS) 1,9 mg/kg, poids sec (1 900 ng/g),
 - Sulfonate de perfluorooctane (PFOS) 0,0052 mg/kg, poids sec (5,2 ng/g),
 - Acide perfluorooctanoïque (PFOA) 0,0025 mg/kg, poids sec (2,5 ng/g).
- Le New Hampshire est le seul État à avoir défini une obligation de mesure des PFAS dans les boues. Depuis 2019, le New Hampshire exige que toutes les boues destinées à l'épandage agricole (SQC) (classes A ou B) soient surveillées. L'État prévoit également d'édicter une norme pour les sols.
- Le Massachusetts (MassDEP) exige depuis 2019 que les boues dont l'épandage est approuvé surveillent la présence de PFAS sur une base trimestrielle.
- Depuis 2021, le Michigan impose des exigences de surveillance des PFAS pour toutes les boues épandues. Depuis 2017, l'épandage de boues d'origine industrielle est interdit. Si le taux de PFOS est supérieur à 125 µg/kg MS, l'épandage sur les terres est interdit. Si le taux de PFOS est compris entre 50 µg/kg MS et 125 µg/kg MS, la quantité épandable doit être réduite à moins de 1,5 tonne de matière sèche/acre²¹ (soit environ 50% de la quantité normalement épandable).
- Trente-deux États n'ont pas d'interdictions

Cinq États ont également défini une obligation de rapportage et d'identification des sources en fonction des concentrations de PFAS retrouvées :

²¹ 1 acre = 0,404 hectare soit 3,7 tonnes par hectare

- Le Colorado impose via les permis de rejet des stations de traitements des eaux usées urbaine (NPDE) l'identification et l'évaluation des sources si le niveau de PFOS dans les boues est supérieur à 50 µg/kg,
- La Floride impose une concentration maximale de 70 ng/L de PFAS dans les effluents des installations de formation contre les incendies,
- Le Maine impose l'évaluation de la contamination des sols et des eaux souterraines résultant de l'épandage autorisé de boues. De plus, une recherche des sources de contamination à l'échelle d'un territoire peut être ordonnée si une concentration supérieure à 20 ng/L est mesurée pour la somme de six PFAS dans l'eau potable distribuée dans les écoles et les garderies.
- Le Michigan impose un suivi régulier des PFAS en fonction des concentrations mesurées dans les boues. Si les concentrations de PFOS sont supérieures à 20 µg/kg, des mesures complémentaires peuvent être ordonnées, par exemple : rechercher les PFAS dans les effluents, recherche des sources. Si les concentrations de PFOS sont supérieures à 50 µg/kg, l'exploitant doit échantillonner les effluents dans les 60 jours et doit rechercher la source. Cela nécessite un rapport intermédiaire, dû six mois après la soumission de l'échantillon de biosolides (boues), et un rapport sommaire, dû quatre mois après le rapport intermédiaire. Les rapports fournissent à l'État toutes les données pour la surveillance des sources, l'échantillonnage du système de collecte et toute autre surveillance effectuée pour l'identification des sources de PFAS.
- Le New Hampshire exige que tous les titulaires de SQC (Sludge Quality Certification) soumettent un rapport annuel décrivant ce qu'ils ont fait pour contribuer à réduire les concentrations de PFAS présentes dans leurs biosolides grâce à la prévention de la pollution à la source.

L'état de Hawaii a également défini des "Niveaux d'action environnementale" dans le document "Interim Soil and Water Environmental Action Levels (EALs) for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)" révisé en avril 2024. Ce document précise la politique de monitoring, les valeurs de références pour différents PFAS dans les compartiments de l'environnement et propose une méthode d'évaluation des risques d'exposition (Figure 11) en fonction des propriétés des 25 PFAS listés dans le Tableau 20 [72] [73] [74].

Tableau 21: Valeurs limites en PFAS dans l'eau potable aux Etats Unis [69]

Group	Protonated Acid Form	CAS Number	Abbreviation
Perfluoroalkyl Sulfonic Acids and Sulfonates	Perfluorobutane sulfonic acid	375-73-5	PFBS
	Perfluoropentane sulfonic acid	1035556	PFPeS
	Perfluorohexane sulfonic acid	355-46-4	PFHxS
	Perfluoroheptane sulfonic acid	375-92-8	PFHpS
	Perfluorooctane sulfonic acid	1763-23-1	PFOS
	Perfluorodecane sulfonic acid	335-77-3	PFDS
Perfluoroalkyl Carbonic Acids and Carboxylates	Perfluoro propanoic acid	422-64-0	PFPrA
	Perfluoro butanoic acid	375-22-4	PFBA
	Perfluoro pentanoic acid	2706-90-3	PFPeA
	Perfluoro hexanoic acid	307-24-4	PFHxA
	Perfluoro heptanoic acid	375-85-9	PFHpA
	Perfluoro octanoic acid	335-67-1	PFOA
	Perfluoro nonanoic acid	375-95-1	PFNA
	Perfluoro decanoic acid	335-76-2	PFDA
	Perfluoro undecanoic acid	2058-94-8	PFUnDA
	Perfluoro dodecanoic acid	307-55-1	PFDoDA
Other	Perfluorooctane sulfonamide	754-91-6	PFOSA
	Hexafluoropropylene oxide dimer acid	13252-13-6	HFPO-DA
	6:2 Fluorotelemer Sulfonic Acid	27619-97-2	6:2 FTS
	4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid	919005-14-4	DONA
	6:2 Fluorotelomer alcohol	647-42-7	6:2 FTOH
	8:2 Fluorotelomer alcohol	678-39-7	8:2 FTOH
	6:2 Fluorotelomer Thioether Amido Sulfonic Acid	62880-95-9	6:2 FtTAoS

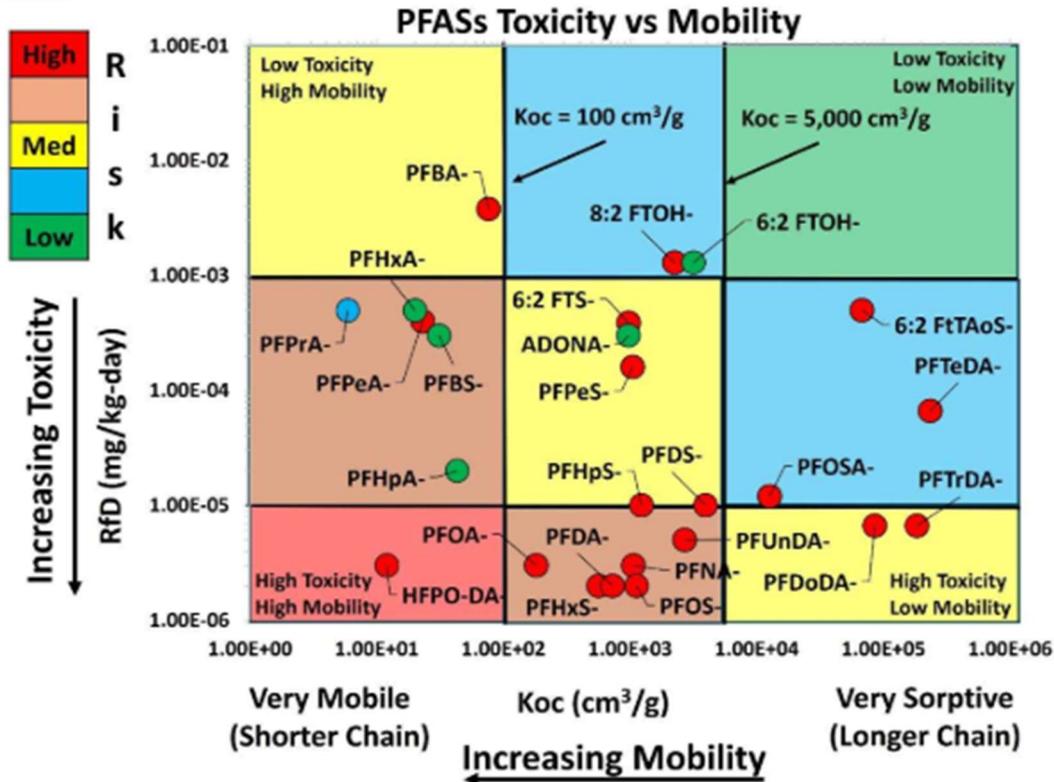


Figure 11 : Evaluation du risque d'exposition en fonction de la toxicité des 25 PFAS suivi dans l'état de Hawaii [72]

2.5.3 Canada

Entre 2018 et 2023, Santé Canada a proposé des valeurs de concentration maximales acceptable dans l'eau potable à 0,6 µg/L pour le PFOS et à 0,2 µg/L pour le PFOA [75]. Santé Canada a également proposé des valeurs préliminaires individualisées pour d'autres PFAS dans l'eau potable (Tableau 22).

Tableau 22 : Valeurs préliminaires dans l'eau potable au Canada

PFAS	Acronyme	Valeur préliminaire dans l'eau potable (microgrammes par litre) (µg/L)
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	30
Sulfonate de perfluorobutane	PFBS	15
Sulfonate de perfluorohexane	PFHxS	0,6
Acide perfluoro-n-pentanoïque	PFPeA	0,2
Acide perfluorohexanoïque	PFHxA	0,2
Acide perfluoroheptanoïque	PFHpA	0,2

Acide perfluorononanoïque	PFNA	0,02
Sulfonate de fluorotélomère 6:2	6:2 FTS	0,2
Sulfonate de fluorotélomère 8:2	8:2 FTS	0,2

En 2023, Santé Canada a révisé ses recommandations avec une concentration maximale à 30 ng/L pour la somme totale des PFAS dans l'eau potable en ne tenant plus compte des concentrations individualisées.

En 2017, Environment and Climate Change Canada a publié les recommandations fédérales pour une concentration maximale de 0,01 mg/kg MS de PFOS dans les sols agricoles et dans les sols résidentiels/parcs. Une limite plus élevée pour les sols commerciaux et industriels a été définie.

Une norme provisoire de 50 µg/kg MS de PFOS dans les boues a été définie par l'agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA).

Le Québec a, pour sa part, un projet de règlement renforçant les normes en distinguant deux catégories de matières fertilisantes, dont les seuils pour la somme de 13 PFAS (dont le PFOS et le PFOA) sont respectivement :

- pour la catégorie I1 : les critères sont :
 - PFOS : 11 µg/kg
 - PFOA : 8 µg/kg
 - somme 11 PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFDA, PFDS, 6:2 FTS, 5:3 FTCA, 7:3 FTCA, NMeFOSAA, NEtFOSAA et FHUEA) : 120 µg/kg
- pour la catégorie I2, les critères sont :
 - PFOS : 50 µg/kg
 - PFOA : 38 µg/kg
 - Somme 11 PFAS (les mêmes) : 600 µg/kg

2.5.4 *Australie*

Les campagnes de mesures réalisées en Australie ont montré une importante contamination de l'environnement par les PFAS. La source principale des PFAS serait l'utilisation des mousses anti-incendie.

L'Australie a adopté un plan national de gestion des PFAS dans l'environnement « PFAS National Environmental Management Plan » (NEMP) en 2018 [76]. La version 3 du NEMP a été soumise à consultation publique et propose la révision de plusieurs valeurs de guide dans l'eau, les boues d'épurations, les sols et le biote. L'adoption définitive de ce plan est prévue pour 2024.

La version 3 du NEMP propose les valeurs répertoriées dans le Tableau 22 [76] :

➤ **Dans l'eau potable et de baignade**

Tableau 23 : Valeurs préliminaires dans l'eau potable et les eaux de baignade en Australie

Table 4 Human health guideline values developed by health authorities^a

Description	Sum of PFOS and PFHxS	PFOA	Comments and source
Tolerable daily intake (TDI)	0.02 µg/kg _{bw} /day	0.16 µg/kg _{bw} /day	FSANZ 2017
Drinking water quality guideline value	0.07 µg/L	0.56 µg/L	Australian Government Department of Health 2019
Recreational water quality guideline value ^b	2 µg/L	10 µg/L	NHMRC 2019

Notes: bw = body weight, µg = micrograms. Where the guideline values refer to the sum of PFOS and PFHxS, this includes PFOS only, PFHxS only, and the sum of the two.

^a NHMRC (2019) notes that people's use of recreational water is not the same, given Australia's climate and geography.

Some recreational water resources may be used less frequently than the assumed guidelines (150 days/year), and (in rare cases) some may be used more frequently. In such cases more locally-appropriate event frequency based recreational guidelines can be considered in consultation with the state and regulatory health regulator.

^b The guidelines address natural fresh, estuarine and marine recreational water bodies but specifically exclude swimming pools, spas and hydrotherapy pools (NHMRC, 2008).

➤ **Dans les eaux de surfaces**

Tableau 24 : Valeurs guides australiennes pour les eaux de surfaces

Table 8 Ecological water quality guideline values

Exposure scenario	Guideline value	PFOS (µg/L)	PFOA (µg/L)
Freshwater (a)	99% species protection – high conservation value systems (b)	0.00023	19 µg/L
	95% species protection – slightly to moderately disturbed systems (c)	0.13	220 µg/L
	90% species protection – highly disturbed systems	2	632 µg/L
	80% species protection – highly disturbed systems	31	1824 µg/L
Interim marine (d)	99% species protection – high conservation value systems	0.00023	19 µg/L
	95% species protection – slightly to moderately disturbed systems	0.13	220
	90% species protection – highly disturbed systems	2	632
	80% species protection – highly disturbed systems	31	1824

(a) The draft guidelines do not account for effects which result from the bioaccumulation and biomagnification of toxicants in air-breathing animals or in animals which prey on aquatic organisms.

(b) The 99% species protection level for PFOS is close to the level of detection. Agencies may wish to apply a 'detect' threshold in such circumstances rather than a quantified measurement.

(c) The WQGs advise that the 99% level of protection be used for slightly to moderately disturbed systems. This approach is generally adopted for chemicals that bioaccumulate and biomagnify in wildlife. Regulators may specify or environmental legislation may prescribe the level of species protection required, rather than allowing for case-by-case assessments.

(d) Freshwater values are to be used on an interim basis until final marine guideline values can be set using the nationally-agreed process under the Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. The WQG advise that in the case of estuaries, the most stringent of freshwater and marine criteria apply, taking account of any available salinity correction. Marine guideline values developed by CRC CARE are under consideration through the nationally-agreed water quality guideline development process.

Data source: Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality – technical draft default guideline values for PFOS and PFOA.

➤ **Pour le biote**

Tableau 25 : Valeurs guides australiennes pour le biote

Table 7 Biota guideline values

Exposure scenario	Sum of PFOS and PFHxS (a)	PFOA (b)	Description
Ecological direct exposure for wildlife diet (d)	3.1 µg/kg	2.8 µg/kg	Mammalian diet – consumption of biota as wet weight food
	8.2 µg/kg	N/A	Avian diet – consumption of biota as wet weight food (c)
Ecological exposure protective of birds (e)	0.2 µg/g	N/A	Whole bird egg as wet weight

(a) Where the guideline values refer to the sum of PFOS and PFHxS, this includes PFOS only, PFHxS only, and the sum of the two. The Canadian ECCC (2018) guidelines refer to the criterion for PFOS only; in the NEMP the guideline values for ecological direct exposure for wildlife diet refer to the levels of PFOS and PFHxS in food consumed by mammals or birds. This has been adapted to allow for uncertainties and potential similar properties and toxicities of PFHxS with PFOS. For the sum of PFOS and PFHxS the tolerable daily intakes adopted are 1.1 µg/kg BW/day for mammals and 7.7 µg/kg BW/day for avian. Details on the methods are provided in the NCWG (2021) supporting documents.

➤ **Pour les boues**

Tableau 26 : Valeurs guides australiennes pour les boues

Table 11 Criteria for PFOS+PFHxS and PFOA in biosolids and maximum allowable soil contaminant concentrations (MASCC) based on a 1, 2 and 5-fold margin of safety

Criteria type	Margin of safety	PFOS+PFHxS (µg/kg)	PFOA (µg/kg)
Biosolids threshold restricted use	5	6.2	25
	2	15	65
	1	31	130
Biosolids threshold unrestricted use*	5	0.22	1.0
	2	0.55	2.5
	1	1.1	5
MASCC	5	0.22	1.0
	2	0.55	2.5
	1	1.1	5

* The unrestricted use threshold may not be applicable in all jurisdictions. Where it is applicable, it should be applied to the final biosolids product for land application.

Remarques :

- Les valeurs sont exprimées en µg/kg MS
- Les facteurs de marge de sécurité correspondent à un nombre diviseur de la concentration considérée comme sans effet pour l'homme ou l'environnement, la PNEC. A titre de comparaison, en Europe un facteur 10 de sécurité est souvent appliqué à la PNEC pour définir les seuils réglementaires des substances dangereuses.
- Les biosolides à usage restreint ne peuvent pas être utilisés en valorisation agricole ou en remblais dans les zones résidentielles.

➤ Dans les sols

Tableau 27 : Valeurs guides australiennes pour les sols

Table 6 Ecological guideline values for soil

Exposure scenario	PFOS	PFOA	Comments and source
Ecological direct exposure – All land uses	1 mg/kg	10 mg/kg	Future work may be undertaken to review available soil guideline values proposed by Australian research and industry organisations. Where reptiles may be exposed directly to soil an interim screening value of 5 µg/kg for PFOA is recommended (a).
Ecological indirect exposure –All land uses	0.01 mg/kg	0.005 mg/kg	The guideline value is based on dietary exposure of a secondary consumer as the most sensitive exposure pathway assessed. This value may not be protective of specific animals relevant to Australia, including predatory animals such as quolls and antechinus. For intensively developed sites with no secondary consumers and minimal potential for indirect ecological exposure, a higher criterion of up to 0.14 mg/kg PFOS may be appropriate as outlined in the accompanying text in Section 8.7.1 .

(a) Based on a LOAEL of 50 µg/kg for reduced growth (Zhang et al. 2020), divided by an uncertainty factor of 10 for inter-species differences (NEPC 2013). As this is based on a LOAEL, it may not be sufficiently protective of endangered, threatened or vulnerable reptiles and high ecological value sites.

Tableau 28 : Valeurs guides australiennes pour l'exposition humaine par les sols

Table 5 Human health investigation levels for soil

Land use	Sum of PFOS and PFHxS	PFOA	Comments and source
Residential with garden/accessible soil (HIL A)	0.01 mg/kg	0.1 mg/kg	Assumes home-grown produce make up to 10% of fruit and vegetable consumed (does not account for consumption of any eggs from home poultry, nor of milk or meat from stock on the premises). Also includes children's day care centres, preschools and primary schools. Note: If home-grown produce provides make up more than the 10% of fruit and vegetable intake consumed, as assumed in the ASC NEPM generic example, a site-specific risk assessment is required. As an example, if home grown produce provides up to 50% of fruit and vegetable intake consumption, the screening value would be 0.002 mg/kg for the sum of PFOS and PFHxS, and 0.02 mg/kg for PFOA.
Residential with minimal opportunities for soil access (HIL B)	2 mg/kg	20 mg/kg	Assumes soil is not used to grow and consume home-grown produce. Includes dwellings with fully and permanently paved yard space such as high rise-buildings and flats. These were derived using the methodology consistent with assumptions set out in the ASC NEPM for HIL B.
Public open space (HIL C)	1 mg/kg	10 mg/kg	Relevant for public open space such as parks, playgrounds, playing fields (e.g. ovals), secondary schools (except for soil used for agricultural studies) and footpaths. Excludes undeveloped public open space (such as urban bushland and reserves), which should be subject to a site-specific assessment where appropriate. These were derived using the methodology consistent with assumptions set out in the ASC NEPM for HIL C.
Industrial/commercial (HIL D)	20 mg/kg	50 mg/kg	Assumes eight hours is spent indoors and one hour spent outdoors at a site such as a shop, office, factory or industrial site. If the typical exposure for a site is predominantly outdoors with significant earthen areas, recalculation of a site-specific value is recommended. These were derived using the methodology consistent with assumptions set out in the ASC NEPM for HIL D. Note: the industrial/commercial direct exposure criterion for PFOA (including its salts and related compounds) has been set a 50 mg/kg in anticipation of the Stockholm Convention low content limit of 50 mg/kg.

Note: Where the guideline values refer to the sum of PFOS and PFHxS, this includes PFOS only, PFHxS only, and the sum of the two.

A noter également que l'état du Queensland a défini depuis 2020, des seuils d'alerte au-delà desquels le producteur de boues est tenu d'informer l'utilisateur de la présence de PFAS et de leurs risques éventuels de contamination de ses sols et cultures.

Tableau 29 : Seuils d'alerte dans les boues dans l'état du Queensland

Contaminant	Trigger value (mg/kg)	Equivalent value (ng/g)
PFOS	0.001	1
PFHxS	0.003	3
PFOS + PFHxS	0.002	2
PFOA	0.004	4
PFBA, PFPeA, PFHxA	0.001	1
Sum C9-C14 Perfluoroalkyl carboxylic acids	0.01	10
Perfluoroalkyl sulfonamides	0.001	1
N:2 Fluorotelomer Sulfonic acids	0.004	4

2.6. Pays asiatiques

2.6.1 Japon

Le Japon a mis en place une politique de suivi des PFAS dans l'environnement au moins depuis 2018. Les résultats montrent une contamination de nombreux cours d'eau avec des concentrations plus fortes qu'aux Etats Unis et en Europe [77] [78].

Le PFOS et le PFOA ont été ajoutés à la liste des « designated substances » dans le « Water Pollution Prevention Act » [79]

En 2020, le Japon a défini provisoirement la concentration maximale à 50 ng/L PFOS + PFOA, dans l'eau potable et dans les eaux brutes (eaux de surface et eaux souterraines). Le PFHxS a été ajouté en mars 2021 à la liste des substances devant être surveillées dans les milieux aquatiques pour la protection de l'environnement.

Les campagnes de suivi ont également montré une contamination très marquée au PFNA [80].

2.6.2 Corée du Sud

La Corée du Sud suit le PFOS, le PFOA et le PFHxS dans les cours d'eau du pays dans le cadre du programme national de suivi des POP depuis 2014 [81].

Les concentrations importantes retrouvées à l'aval des zones urbaines et des zones industrielles ont poussé le pays à définir en 2017 la concentration maximale dans l'eau potable à 70 ng/L PFOS + PFOA et à 480 ng/L de PFHxS et à suivre ces substances en sortie de station d'épuration.

2.7. Synthèse

Les conventions internationales sur les POPs, le commerce des produits chimiques ou sur les boues sont relativement anciennes et tiennent peu en compte les PFAS. Cette situation est en train de changer rapidement afin de prendre en compte les dernières connaissances scientifiques et pour s'aligner sur les réglementations en cours d'adoption dans les principaux pays développés.

Les réglementations portent principalement sur les PFAS en C8 (PFOS et PFOA) et sont en cours d'extension aux PFCA et PFSA en C4-C7 et C9-C14, ainsi que leurs principaux produits de substitution (PFOSA, GenX, C6O4, ADONA, FTS...). Les règlements adoptés peuvent porter sur les points suivants :

- **Interdiction ou restrictions des usages des principaux PFAS** avec pour objectif une interdiction universelle à moyen terme. Dans l'Union Européenne, plusieurs directives et règlements entreront en vigueur en 2026 afin de limiter très fortement l'usage des PFAS ;
- **Mise en place de politiques publiques de surveillance des PFAS** dans les différents compartiments de l'environnement afin d'inventorier le niveau de contamination et identifier les polluants émergents ;
- **Définition de normes (provisoires) sur des concentrations de PFAS à ne pas dépasser** dans l'alimentation, l'eau potable, les milieux aquatiques, les sols, les produits fertilisants dont les boues. Les normes les plus anciennes portent généralement sur des **concentrations maximales en PFOS et en PFOA**. Les normes plus récentes visent une **liste élargie de 6 à 47 substances** présent individuellement ainsi que **des sommes d'une vingtaine de PFAS parfois pondérée selon des facteurs de risque**. Par exemple, la future NQE révisée, pour les eaux superficielles continentales, utilisera une somme de la concentration de 24 PFAS pondérée selon le "Relative Potency Factor - RPF" donnant un équivalent PFOA pour chaque substance. Ces indicateurs présentent l'avantage de prendre en compte les effets cocktail et d'être plus facile à comprendre pour les décideurs compte tenu du grand nombre de substances concernées ;
- La réalisation d'une **analyse des risques** pour les PFAS sur la base d'une approche HACCP notamment dans les pays anglo-saxons ;
- L'Allemagne, la France, les pays nordiques et certains états anglo-saxons : Hawaï, Michigan, Queensland ont également adopté des règles afin de définir des **seuils d'alerte au-delà desquels des mesures doivent être engagées**, telles que : la recherche des sources de contamination, la réalisation de campagnes complémentaires de suivi sur les sites au-delà des seuils, la restriction/interdiction de l'usage des produits contenant certains PFAS (notamment la valorisation agricole des boues), l'information du consommateur de produit fertilisant d'une teneur élevée en PFAS, le lancement d'une alerte par les autorités sanitaires, etc. ;
- **Information du public** sur le risque PFAS et les résultats des campagnes de surveillance.

➤ Les PFAS dans les eaux usées

Les études scientifiques ont montré que les stations d'épuration étaient une des principales voies de transfert des PFAS vers l'environnement. Aussi plusieurs pays, ont ajouté les PFAS à la liste des substances émergentes à suivre en sortie de station d'épuration. Ces programmes de surveillance commencent à livrer leurs 1ers résultats (ex. RSDE en France, CIP3 au Royaume Unis, NEMP 2 en Australie, Allemagne, Autriche, Japon, Corée du Sud...) et doivent servir de base pour la définition d'éventuelles valeurs limites.

Actuellement, les limites de rejets de PFAS dans les eaux usées sont le plus souvent définies via **les permis de rejets** ou les règles nationales sur les rejets d'effluents industriels (par exemple la France limite les rejets de PFOS à 25 µg/L dans les rejets des ICPE). Ces valeurs sont généralement définies afin d'éviter les dépassements des valeurs seuils définies dans les eaux superficielles continentales, les eaux souterraines et l'eau potable. En Europe, l'entrée en

vigueur des révisions des directives **EDCH** (seuils de 0,50 µg/l pour le total des PFAS et de 0,10 µg/l pour la somme des 20 PFAS) et la **DCE-NQE** (valeur moyenne de 4,4 ng/L d'équivalent PFOA pour la somme de 24 PFAS dans les eaux superficielles) vont certainement imposer aux états membres la (re)définition de limites de rejet plus strictes sur les substances concernées comme c'est déjà le cas au Danemark ou en Allemagne.

➤ **Les PFAS dans les boues**

Actuellement, peu de pays ont défini des normes/valeurs guides sur les PFAS dans les boues ou les "biosolides". Néanmoins, la situation est en train d'évoluer rapidement car les 1ères campagnes d'évaluation des risques commencent à fournir leurs résultats. Ainsi, la liste des substances prises en compte s'allonge progressivement et les valeurs cibles applicables sont revues à la baisse. En général, les normes se limitent sur des teneurs en PFOS (parfois sommées avec celles en PFHxS) et en PFOA (parfois une somme de PFAS traduite en équivalents PFOA). Dans aucun pays, il n'est fait de distinction sur la filière de traitement des boues, seule compte la teneur finale en PFAS des boues valorisées en agriculture. Cette limite, lorsqu'elle existe, est souvent définie via une réglementation sur les fertilisants. La valorisation agricole est interdite lorsque qu'elle dépasse les seuils suivants :

Tableau 30 : Seuils d'interdiction de valorisation agricole des boues

Pays	Définition du seuil	Valeur du seuil
<i>Autriche</i>	<i>PFOA + PFOS</i>	<i>100 µg/kg MS</i>
<i>Allemagne</i>	<i>PFOA + PFOS</i>	<i>100 µg/kg MS</i>
<i>Norvège</i>	<i>PFOA + PFOS</i>	<i>40 µg/kg MS</i>
<i>Suède</i>	<i>PFOS</i>	<i>120 µg/kg MS</i>
<i>USA - Michigan</i>	<i>PFOS</i>	<i>125 µg/kg MS</i>
<i>Canada</i>	<i>PFOS</i>	<i>50 µg/kg MS (provisoire)</i>
<i>Danemark</i>	<i>Somme 4 PFAS²²</i>	<i>10 µg/kg MS</i>
<i>Danemark</i>	<i>Somme 22 PFAS²³</i>	<i>400 µg/kg MS</i>
<i>Australie</i>	<i>PFOA</i>	<i>25 à 130 µg/kg MS (proposition)</i>
<i>Australie</i>	<i>PFOS + PFHxS</i>	<i>6,2 à 31 µg/kg MS (proposition)</i>

Certains Pays/Etats ont également définis des seuils d'alerte dans boues au-delà desquels il est nécessaire de prendre des mesures :

Tableau 31 : Seuils d'alerte pour les PFAS des boues

Pays	Définition du seuil	Valeur du seuil	Action
<i>Allemagne</i>	<i>PFOA + PFOS</i>	<i>50 µg/kg MS</i>	<i>Affichage que le lot de boues contient des PFAS</i>

²² PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS

²³ PFBS, PFPS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnS, PFDoS, PFTrS, PFOSA, 6:2 FTS, PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFTrDA

<i>Colorado – Etats Unis</i>	<i>PFOS</i>	<i>50 µg/kg MS</i>	Identification et évaluation des sources
<i>Michigan – Etat Unis</i>	<i>PFOS</i>	<i>20 µg/kg MS</i>	Ordonnance de mesures complémentaires
		<i>50 µg/kg MS</i>	Recherche des PFAS dans les effluents Recherche des sources
<i>Queenslands – Australie</i>	<i>PFOS</i>	<i>1 µg/kg MS</i>	Affichage que le lot de boues contient des PFAS
	<i>PFHxS</i>	<i>3 µg/kg MS</i>	
	<i>PFOS+PFHxS</i>	<i>2 µg/kg MS</i>	
	<i>PFOA</i>	<i>4 µg/kg MS</i>	
	<i>PFBA, PFPeA, PFHxA</i>	<i>1 µg/kg MS</i>	
	<i>Somme PFCA C9-C14</i>	<i>10 µg/kg MS</i>	
	<i>PFOSA</i>	<i>1 µg/kg MS</i>	
	<i>N:2 FTS</i>	<i>4 µg/kg MS</i>	

A noter également, que plusieurs pays/états n'autorisent pas la valorisation agricole des boues en agriculture ou en limite très fortement l'usage comme en Suisse, au Luxembourg et dans l'Etat du Maine. Pour d'autres pays la limite est indirecte car elle concerne une valeur maximale très basse dans les sols ou les eaux souterraines notamment pour le PFOS et le PFOA comme au Danemark.

Plusieurs pays ont également annoncé leur volonté d'abaisser les seuils et d'étendre la liste des substances à suivre comme l'Allemagne et les Etats Unis.

Le Québec a, pour sa part, un projet de règlement renforçant les normes en distinguant deux catégories de matières fertilisantes, dont les seuils pour la somme de 13 PFAS (dont le PFOS et le PFOA) sont respectivement :

- pour la catégorie I1 : les critères sont :
 - PFOS : 11 µg/kg
 - PFOA : 8 µg/kg
 - somme 11 PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFDA, PFDS, 6:2 FTS, 5:3 FTCA, 7:3 FTCA, NMeFOSAA, NEtFOSAA et FHUEA) : 120 µg/kg
- pour la catégorie I2, les critères sont :
 - PFOS : 50 µg/kg
 - PFOA : 38 µg/kg
 - Somme 11 PFAS (les mêmes) : 600 µg/kg

3. Sources d'émission

3.1. Utilisations des PFAS

Les PFAS dans l'environnement ont une origine uniquement anthropique, c'est-à-dire due à l'activité humaine. Les PFAS ont de multiples usages et applications. Ils peuvent intervenir dans la composition d'un produit, être utilisés ou être formés lors d'une étape de la fabrication ou pendant une étape du cycle de vie d'un produit. L'ECHA met en avant 15 secteurs majeurs d'utilisations et une production mondiale de PFAS annuelle estimée entre 117 000 tonnes et 396 000 tonnes en 2020 [21].

La liste ci-dessous dresse un panorama non exhaustif des principales utilisations des PFAS [13] :



- Composants pour emballages alimentaires en papier et en carton (utilisation du diPAP)



- Fluides réfrigérants des pompes à chaleur, climatiseurs et autres appareils de production de froid (utilisation de PFAS à chaînes ultra courtes tel de la famille des HFO qui se dégradent en TFA et TA/TfoH)



- Mousse anti-incendie (utilisation du PFOS, PFOA, 10:2 FTS, le 8:2 FTS et le 6:2 FTS)



- Produits utilisés pour la photographie, la lithographie (utilisation du PFOS)



- Fart utilisé sous les skis pour améliorer la glisse



- Isolant pour fils électriques, appareils électroniques, production de panneau solaire et d'éolienne [82]



- Certains produits ménagers, agents imperméabilisants ou antitaches dans l'industrie du textile (vêtements de pluie, moquettes et tissus d'ameublement). L'industrie textile utilise environ 10% de la production annuelle de PFAS (utilisation du PFOS, du PFHxS)



- Ustensiles de cuisine anti-adhésion, embouts buccaux de cigarette électronique, semelles de fers à repasser (utilisation du PFOA, GenX, PFBS, DONA, ADONA, PTFE, PFA)



- Fabrication de cosmétiques, de produit d'hygiène tels que le papier toilette, les couches, les protections périodiques ou les préservatifs ou encore les agents antibuée, antistatiques ou lubrifiant (utilisation notable du diPAP)



- Lubrifiants et cires pour sols et voitures, réfléchissants pour vernis et peintures



- Additifs de produits pesticides (utilisation du flufenacet et diflufenican qui se dégradent en TFA)

Malgré les difficultés d’avoir un recensement fiable, on estime qu’actuellement environ 600 des 5000 molécules de PFAS existantes ont des applications commerciales. De nombreux usages ont recours à des mélanges de plusieurs molécules de PFAS et certaines fabrications génèrent des impuretés à l’origine de rejets difficiles à identifier.

Au cours de la dernière décennie, sous l’effet des réglementations européennes et américaines, de nombreux fabricants ont progressivement éliminé la production de PFAS à base de chaîne C8 (PFOA et PFOS). Par conséquent, les rejets industriels de PFOA et de PFOS ont diminué dans les pays développés depuis 2006. Néanmoins, les rejets industriels de PFAS dans l’environnement ont augmenté dans de nombreux autres pays, comme la Chine, en raison de l’expansion de l’industrie chimique fluorée. Par ailleurs, depuis que les productions de C8 ont été restreintes, la production de PFAS à chaîne courte (C2 à C7) a augmenté.

Tableau 32 : Emission européennes de PFAS par secteur en 2023 [83]

Application	Tonnage range	Emission range [% emitted in manufacturing and use phase]	Emission contribution [% contribution to total emissions]
Applications of fluorinated gases	> 10 000	5 – 25	> 50
Textiles, upholstery, leather, apparel & carpets	> 10 000	5 – 25	10 – 30
Medical devices	> 10 000	5 – 25	5 – 10
Manufacture	> 10 000	0 – 5	1 – 5
Food contact materials and packaging	> 10 000	0 – 5	0 – 1
Transport	> 10 000	0 – 5	0 – 1
Construction products	1 000 – 10 000	25 – 75	1 – 5
Electronics and semiconductors	1 000 – 10 000	5 – 25	0 – 1
Lubricants	1 000 – 10 000	5 – 25	0 – 1
Petroleum and mining	1 000 – 10 000	0 – 5	0 – 1
Energy sector	1 000 – 10 000	0 – 5	0 – 1
Metal plating and manufacture of metal products	100 – 1 000	0 – 5	0 – 1
Cosmetics	10 – 100	> 95	0 – 1
Consumer mixtures	10 – 100	75 – 95	0 – 1
Ski wax	0 – 10	25 – 75	0 – 1

3.2. Sources d’émission

Les PFAS sont utilisés à différentes étapes du cycle de vie des produits qu’ils composent et peuvent donc se retrouver dans différentes sources d’émissions.

3.2.1 Les sites industriels

Les PFAS entrent dans la formulation de nombreux produits et peuvent être utilisés lors de process industriels. Les process industriels peuvent aussi induire la **production d’impuretés et de produits de dégradation** qui seront également émis dans l’environnement. Les sites industriels utilisant ces produits peuvent contaminer leur environnement soit par des rejets aqueux, des rejets gazeux et par l’adsorption des PFAS sur les aérosols. Ces rejets vont par la suite contaminer de manière directe ou indirecte les réseaux d’assainissement, les sols, les eaux de surfaces, les eaux souterraines et les écosystèmes sur plusieurs kilomètres en touchant tous les compartiments. Les sites concernés par ce type d’émissions sont les usines chimiques, les établissements de traitement de surface, les ateliers de peintures, les blanchisseries industrielles, les sites de productions d’ustensile de cuisine, les sites de production d’emballage en papier et carton, les centres de nettoyage auto ...

Il est important de noter que **certains industriels ignorent qu’ils utilisent des PFAS** car les produits qu’ils utilisent ne mentionnent pas forcément la présence de ces additifs dans leur composition [84].

Une étude actuellement conduite dans la région française d'Auvergne Rhône Alpes a montré l'importance de réaliser un suivi en sortie de station de traitement des eaux usées, sur les points de rejet d'eaux pluviales et sur les points de rejets des industries à risque [84].

Un guide publié par le ministère de l'environnement allemand permet de lister les activités à risque et les substances utilisées par ces secteurs [55]. Les points ci-dessous présentent un extrait de ce document.

3.2.1.1 Les sites de traitement de surface et de placage métallique

Les PFAS sont utilisés dans le traitement de surface lors du chromage dur, du chromage décoratif et de la galvanoplastie des plastiques utilisant du chrome. Depuis 2015, le règlement européen sur les POPs autorise uniquement l'utilisation de PFAS comme antibuée pour le chromage dur (VI) non décoratif dans les systèmes en boucle fermée.

Période d'utilisation : d'environ 1960 à aujourd'hui (exemption pour le PFOS)

Substances/groupes de substances PFAS : PFOS, 6:2 FTS, PFBS, PFHxS

Secteurs : finition de surface/technologie de surface utilisant les procédés suivants :

- 1ère priorité : chromage dur, chromage décoratif, galvanoplastie des matières plastiques au chrome
- 2ème priorité : zingage, cuivrage, nickelage, dorure, galvanoplastie, métaux précieux, anodisation

3.2.1.2 Industrie textile

Les usines textiles qui utilisent des procédés de finition humide pour appliquer des produits d'imperméabilisation et de protection contre les taches ou pour produire des membranes sont pertinentes en termes de sites contaminés et d'eaux usées.

Période d'utilisation : d'environ 1960 à aujourd'hui (à l'exception du PFOS : interdit en 2009)

Substances/groupes de substances PFAS : résines fluorocarbonées, polymères fluorés, PFOS, PFOA, 6:2 FTOH, acrylates de fluorotélomères, polymères fluorés à chaîne latérale à base de C6

Secteurs : fabrication de textiles, textiles techniques, tapis, membranes (ex. Gore-Tex)

3.2.1.3 Fabrication de peintures et vernis

Tous les sites de production ne sont pas forcément concernés. La contamination des sites est plus probable lorsque des additifs PFAS ont été utilisés dans la fabrication de peinture ou de vernis.

Période d'utilisation : d'environ 1960 à aujourd'hui (à l'exception du PFOS interdit en 2009)

Substances/groupes de substances PFAS : PFOS et substances apparentées au PFOS, PFBS, polyéthers fluorés, fluoropolymères – PVDF (fluorure de polyvinylidène – polymère de C₂H₂F₂).

Secteurs : fabrication de peintures et de vernis – peintures/verniss aux propriétés hydrofuges, antitaches et oléofuges ; fabrication d'encres d'imprimerie (ateliers de peinture et établissements industriels dotés d'installations de peinture)

3.2.1.4 Industrie des semi-conducteurs

Les procédés utilisés ne présentent normalement pas de risque environnemental spécifique pour les sols ou les eaux souterraines.

Période d'utilisation : d'environ 1995 à aujourd'hui (à l'exception du PFOS interdit en 2009)

Substances/groupes de substances PFAS : PFOS, précurseurs basés sur la chimie C8, C6 et C4

Secteurs : fabrication de semi-conducteurs

3.2.1.5 Industrie de la photographie

Le risque de contamination pour ces sites est normalement faible.

Période d'utilisation : d'environ 1995 à aujourd'hui, principalement jusqu'en 2000

Substances/groupes de substances PFAS : PFOS, précurseurs basés sur la chimie C8, C6 et C4

Secteurs : production de médias imprimés, laboratoires de développement, entreprises impliquées dans le traitement des solutions de développement.

3.2.2 Les sites d'utilisation des mousses extinctrices

Des contaminations aux PFAS sont attestées sur les sites où des mousses d'extinction d'incendie ont été utilisées [8]. En effet, les mousses d'extinction, et en particulier celles contenant des agents formant un film flottant (AFFF), des AFFF résistants à l'alcool (AR-AFFF), des agents formant un film flottant protéinique (FFFP), des FFFP résistants à l'alcool (AR-FFFP), des agents fluoroprotéiniques (FP) et des FP résistants à l'alcool (AR-FP), contiennent des agents tensioactifs fluorés. Ces mousses sont généralement utilisées sur les sites de production et de stockage d'hydrocarbures, les usines chimiques, les aéroports, les bases militaires et les centres d'entraînement à la lutte contre les incendies. Elles sont aussi utilisées par les services de protection incendies (pompiers, sécurité civile) lors des interventions notamment sur les feux d'hydrocarbures. Ces mousses contaminent durablement les zones où elles sont utilisées et peuvent gagner les réseaux d'assainissement par ruissèlement et lessivage des sols.

Les mousses AFFF « ancienne génération » contenaient du PFOS et/ou du PFOA. Ces mousses ont été progressivement remplacées après les restrictions en 2008 pour PFOS et 2013 pour PFOA.

Les mousses AFFF « nouvelle génération » contiennent des substituts de PFAS à chaînes courtes (C4 à C6) ou à chaînes longues (C9 à C20), considérées comme non-précurseurs. Ces mousses contiennent toujours des PFAS et des produits de dégradation considérés comme SVHC, tels que le 10:2 FTS, le 8:2 FTS, le 6:2 FTS [8] le PFHxA et le PFHxS.

3.2.3 Les aéroports, aérodromes et ateliers de maintenance aéronautique

Dans l'aéronautique, les PFAS sont utilisés comme fluide hydraulique (en faible quantité) et comme isolant de matériel électronique.

Les PFAS pouvant provenir de cette activité sont le PFOS et le potassium perfluoroethyl cyclohexyl sulfonate (FC-98).

L'usage de mousses extinctrices est également plus fréquent en raison de la présence d'hydrocarbures. Une surveillance des effluents de ces sites est donc nécessaire car ils sont souvent cités comme source importante de contamination.

3.2.4 *Les sites de gestion des déchets*

Les PFAS se retrouvent dans les déchets générés par les produits de consommation en fin de vie. Les PFAS seront donc potentiellement très présents dans les effluents de certains sites de traitement des déchets tels que les centres de tri, les usines de recyclage, les centres de valorisation énergétique et les centres d'enfouissement. Les PFAS, vont notamment être retrouvés dans les lixiviats issus de ces installations. Les anciens sites d'enfouissements sont également identifiés comme une source fréquente et importante de contamination des eaux.

3.2.5 *Les abattoirs*

Les campagnes de suivi et de recherche des sources de contamination aux Etats Unis ont montré que les effluents liquides des abattoirs de porc et de volailles présentent des taux élevés de PFAS.

Les sources possibles sont les emballages, les revêtements de sol et murs spécifiques contenant des PFAS afin de renforcer leur résistance aux biocides ou le paillage "nouvelle génération" utilisé dans les élevages.

La liste des PFAS détectés n'est pas précisée [71].

3.2.6 *Les établissements de santé*

Le matériel employé dans les hôpitaux contient de nombreux PFAS mais la filière de traitement appliqué pour les déchets médicaux (incinération) limite la contamination des effluents aqueux. En revanche, l'emploi de revêtements spécifiques résistants aux biocides ou de tissus antitaches peut être une source significative de contamination des effluents liquides de ces sites [71].

3.2.7 *Les émissions diffuses*

Les PFAS vont se disperser dans l'environnement via la déposition d'aérosols notamment issus de l'usinage ou la combustion des produits contenant des PFAS, l'épandage agricole (notamment de boues ou de pesticides additivés avec des PFAS), ainsi qu'à l'occasion d'événements accidentels tels que les incendies [13]. Une partie de cette contamination va pouvoir gagner les stations d'épuration via les réseaux d'eaux pluviales et les réseaux d'assainissement unitaires.

Les usages domestiques des PFAS constituent une part importante de la contamination PFAS arrivant en station d'épuration. Cela concerne notamment l'utilisation de produits d'entretien, de cosmétiques, de produit d'hygiène, d'antibuée, de produits contenant du téflon ou du goretex et le lavage des textiles. Les diPAP sont caractéristiques d'un usage

domestique. Les premières campagnes de suivi des TFA réalisées en Europe montrent également une présence généralisée dans les milieux aquatiques.

Les PFAS sont utilisées dans de nombreux produits de consommation courante, des produits utilisés par des activités artisanales ou des applications industrielles. Cela implique qu'à l'échelle d'un territoire les sources de PFAS peuvent être diverses et variées et vont dépendre du bassin de population et des activités économiques historiques ou actuelles. En dehors des sites industriels producteurs ou consommateurs de PFAS, il est donc souvent complexe de déterminer la source d'une contamination. Cela est d'autant plus vrai pour les PFAS à chaîne courte qui sont très mobiles et qui résultent souvent de la dégradation d'autres PFAS à chaîne plus longue. Les PFAS à chaîne plus longues, tels que les FTS utilisés dans les mousses anti-incendie ou les diPAP utilisés dans les cosmétiques sont plus spécifiques et peuvent être rattachés à certains usages surtout lorsqu'ils sont mesurés en combinaison avec d'autres PFAS.

4. Comportements des PFAS dans l'environnement et dans les stations d'épuration

4.1. Dans l'environnement

Les études sur les propriétés, le comportement dans l'environnement, l'écotoxicité et la toxicité sur l'homme des PFAS sont principalement limitées au PFOS, au PFOA et au PFHxS. Ces PFAS ont attiré l'attention en raison de leur toxicité, de leur écotoxicité, de leur caractère de polluant très persistant, et d'une présence déjà généralisée dans l'eau, l'air, le sol, les pluies, les écosystèmes (faune en particulier) et dans le sang de la population générale humaine et de la faune. Les connaissances sur les autres PFAS sont encore parcellaires et insuffisantes, notamment sur les « précurseurs » [6].

Les PFCA et PFSA sont des acides forts et sont donc présents dans l'environnement principalement sous forme anionique de sels carboxylates ou sulfonates : ceci leur confère une solubilité importante et en fait des **polluants mobiles dans l'environnement** ou ils vont potentiellement gagner tous les compartiments et contaminer la chaîne alimentaire.

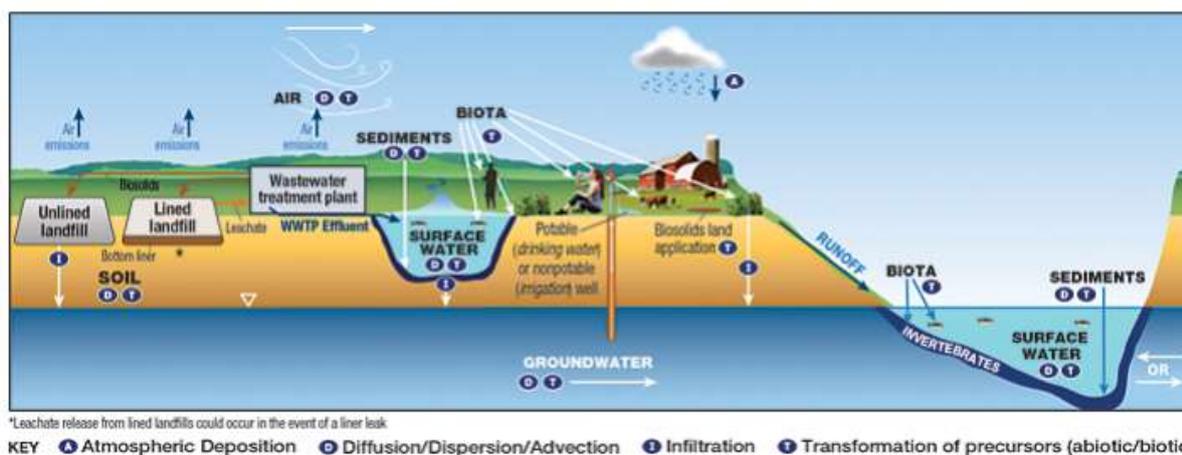
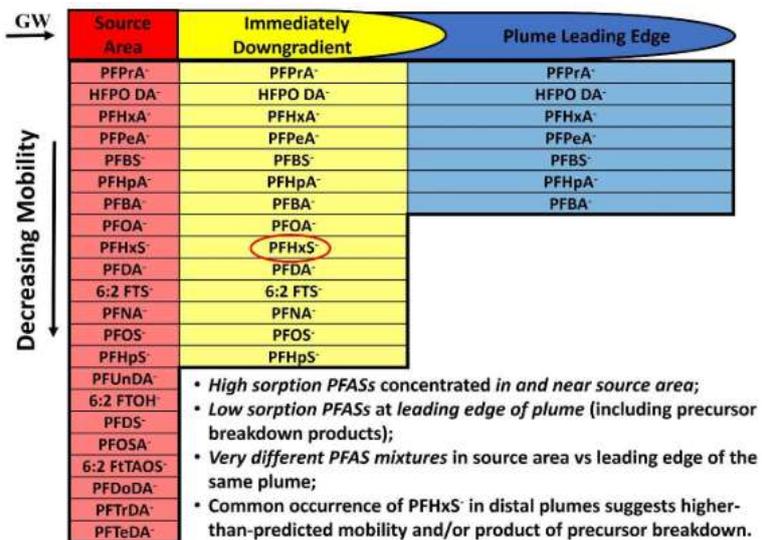


Figure 12 : Dispersion des PFAS dans l'environnement [81]

Le comportement des PFAS dépend fortement de la structure de chaque molécule [85], qui influence son niveau de solubilité ou à l'inverse, sa propension à s'adsorber sur les particules de sol ou les matières en suspension (MES) dans l'eau, et la part des émissions gazeuses. Il est donc compliqué de proposer une typologie comportementale des PFAS. Mais il reste possible d'établir des schémas comportementaux généraux, en fonction de la **longueur de la chaîne carbonée** : plus elle compte un nombre élevé d'atomes de carbone, plus la capacité d'adsorption de la molécule sera élevée. La masse moléculaire élevée des PFAS polymères ou à chaîne très longue (> C21) leur confère une faible mobilité dans l'environnement car ils vont rapidement s'adsorber. Ils sont donc considérés comme "moins préoccupants". Le Tableau suivant illustre la séparation des différents PFAS selon leur coefficient de sorption.

Tableau 33: Séparation hypothétique du panache des eaux souterraines des PFAS basée sur les coefficients de sorption des composés individuels [73]



GW →	Source Area	Immediately Downgradient	Plume Leading Edge
	PFPrA ⁻	PFPrA ⁻	PFPrA ⁻
	HFPO DA ⁻	HFPO DA ⁻	HFPO DA ⁻
	PFHxA ⁻	PFHxA ⁻	PFHxA ⁻
	PFPeA ⁻	PFPeA ⁻	PFPeA ⁻
	PFBS ⁻	PFBS ⁻	PFBS ⁻
	PFHpA ⁻	PFHpA ⁻	PFHpA ⁻
	PFBA ⁻	PFBA ⁻	PFBA ⁻
	PFOA ⁻	PFOA ⁻	
	PFHxS ⁻	PFHxS ⁻	
	PFDA ⁻	PFDA ⁻	
	6:2 FTS ⁻	6:2 FTS ⁻	
	PFNA ⁻	PFNA ⁻	
	PFOS ⁻	PFOS ⁻	
	PFHpS ⁻	PFHpS ⁻	
	PFUnDA ⁻		
	6:2 FTOH ⁻		
	PFDS ⁻		
	PFOSA ⁻		
	6:2 FtTAOS ⁻		
	PFDoDA ⁻		
	PFTrDA ⁻		
	PFTeDA ⁻		

Decreasing Mobility ↓

- High sorption PFASs concentrated in and near source area;
- Low sorption PFASs at leading edge of plume (including precursor breakdown products);
- Very different PFAS mixtures in source area vs leading edge of the same plume;
- Common occurrence of PFHxS⁻ in distal plumes suggests higher-than-predicted mobility and/or product of precursor breakdown.

Toutefois, Les PFAS à chaîne longue ont des persurances variables dans l'environnement et **sont souvent dégradés en PFAS à chaîne plus courte**, lorsqu'ils sont oxydés. La liste des PFAS présents dans les échantillons peut donc constituer un indicateur sur la distance de la source de contamination.

La dégradation des PFAS par incinération peut être à l'origine de polluants dans l'atmosphère si la température de dégradation suffisante d'au moins 1100 ° C n'est pas atteinte et si le traitement des fumées n'est pas efficace. Une étude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS publiée par l'INERIS en 2023 [86] indique qu'il est même nécessaire d'avoir une température supérieure à 1300°C (voir 1400°C) pour avoir une minéralisation complète des PFAS et de leurs sous-produits. Cette gamme de température ne peut être atteinte que par les incinérateurs de déchets dangereux avec une plage de température comprise entre 1 100 et 1 300 °C. Les incinérateurs à ordure ménagère avec une plage de température comprise entre 750 et 1100° C ou à lit fluidisé dense avec une plage de température de 850-900°C ne sont pas assez chauds et risquent donc de produire des PFAS à chaîne courte plus stables thermiquement si le système de traitement des fumées n'est pas adapté.

Les PFCA et les PFSA étant des acides forts, plusieurs études ont montré que leur solubilité est inversement proportionnelle au pH. Un sol acide aura donc plus de capacité à fixer les PFAS. Néanmoins, le pH n'explique pas à lui seul les comportements des PFAS dans les sols car il faut aussi tenir compte des rôles relatifs des différents composants du sol, tels que le carbone organique et son état de décomposition, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et les argiles. Ces mécanismes restent encore à comprendre, notamment comment leurs contributions relatives peuvent être modifiées lors d'un changement de pH [85] [87].

4.2. Le cas des stations d'épuration urbaines

Les PFAS sont utilisés dans de nombreux produits de consommation courante, des produits utilisés par des activités artisanales ou des applications industrielles. Bien qu'utilisés en faible

quantité, ils présentent un risque important d'entrer dans les réseaux d'eaux usées urbains puis en station de traitement des eaux usées urbaines. Les études démontrent que les PFAS sont effectivement souvent mesurés au niveau des stations d'épuration.

Les effluents en sortie de stations d'épuration et les boues produites sont également souvent cités comme voies de transfert importantes de la pollution PFAS vers le milieu environnant et les parcelles où des boues ont été épandues [71]. Il est donc intéressant de voir comment se comportent les PFAS dans ces installations.

4.2.1 *Compartiment eau*

Plusieurs études réalisées dans le cadre de programme nationaux de surveillance des PFAS aux Etats-Unis [71], en Australie [76], en France [88], aux Pays-Bas [89] et Royaume Unis [66] ou dans le cadre de recherche (Chine, Pays Bas, Japon) ont montré que **les stations d'épuration classiques sont quasiment "transparentes" pour les PFAS**. C'est à dire que la quantité de PFAS entrante en station est généralement équivalente à la quantité retrouvée en sortie [9] [88] [90].

➤ **Dégradation des PFAS**

L'action des microorganismes ou les processus d'oxydation ayant lieu dans le bassin d'aération vont avoir un effet minime sur les PFAS en raison de la force de la liaison F-C. Dans tous les cas, les produits de dégradation de PFAS sont d'autres PFAS à chaîne plus courte et plus stables [88]. Les précurseurs et les polymères peuvent se dégrader en PFAS à chaîne plus courte dont le PFOA ou le PFOS. C'est pour cette raison que les précurseurs font l'objet d'une attention croissante. Néanmoins les voies de dégradation et les produits intermédiaires et les produits terminaux de la dégradation des précurseurs sont encore mal connus mais très nombreux. Dans certains cas, il est intéressant de noter que plusieurs programmes nationaux de suivi des PFAS (Etats-Unis, en Australie, en France, au Pays-Bas et Royaume Unis) ont montré **des rendements épuratoires négatifs** dans les effluents de sortie sur plusieurs stations d'épuration.

L'explication donnée pour ces cas est que des PFAS à longue chaîne et des polymères non suivis se dégradent en PFAS à chaîne courte pendant le traitement et serait ainsi quantifiés dans les prélèvements de sortie. Des phénomènes de désorption sont également cités comme une explication probable [9] [76] [66] [89].

Il est également démontré que les traitements complémentaires utilisés pour la désinfection et le traitement des micropolluants donnent des résultats divers sur les PFAS. L'ozonation simple permet en général un abattement d'environ 90% des PFAS à chaîne longue mais engendre une quantité équivalente de PFAS à chaîne courte alors que dans le même temps l'abattement des PFAS à chaîne courte n'est que de 10 à 30 %. L'ozonation simple sur des effluents de station d'épuration risque donc de provoquer une forte augmentation de la teneur en PFAS mesurée en sortie par rapport à l'entrée [91] [92].

L'application d'un traitement UV montre généralement un abattement de l'ordre de 15-20% de la concentration en PFAS et peut être considérée comme négligeable [93].

Les seuls traitements efficaces qui montrent un taux d'abattement satisfaisant et compatible avec les effluents d'une station d'épuration est l'utilisation de systèmes de filtration tels que des filtres à charbon actif ou des résines qui vont avoir pour rôle d'adsorber les PFAS présents dans la phase aqueuse. Les filtrations membranaires donnent également de bons résultats mais ont une consommation énergétique importante [92].

➤ **Adsorption**

L'adsorption sur les boues est le mécanisme principal d'élimination des PFAS de la phase aqueuse dans les STEP [9]. Les coefficients de partage sont généralement utilisés pour décrire la répartition d'une substance entre les phases solide et liquide. Le comportement de sorption des PFAS diffère cependant de celui des contaminants « traditionnels », car les PFAS ont tendance à se lier aux membranes cellulaires et aux protéines plutôt qu'à l'huile. Des facteurs tels que le pH, la composition des eaux usées et la structure des PFAS influencent le partage des PFAS. Par exemple, avec une diminution du pH (de 9 à 2), le partage des PFAS (qui sont des acides forts) avec les boues s'intensifie, ce qui entraîne une sorption accrue sur les boues dans des conditions acides. La structure chimique des PFAS, en particulier la longueur de la chaîne de carbone, dicte le comportement de partition de ces PFAS entre les phases liquides et solides. Par exemple, la structure en anneau hexagonal du sulfonate de perfluoroéthylcyclohexane a été associée à une meilleure adsorption sur les sédiments, tandis que les liaisons éther présentes dans l'ADONA ont nui à son adsorption sur les particules en suspension. De manière générale, on peut affirmer que les PFAS à chaînes courtes se trouvent principalement dans la phase aqueuse et que les PFAS à chaînes longues se lient davantage aux boues. Les PFSA (comme le PFOS) se lient plus fortement aux boues que les PFCA (par exemple le PFOA). De nombreux précurseurs se lient également aux boues.

➤ **Volatilisation**

La plupart des PFAS ont une volatilité négligeable [9]. Cependant, de nombreux précurseurs, tels que les alcools fluorotélomères (FTOH), les perfluoroalcane sulfonamido éthanols ou les HFO sont volatils [94]. Néanmoins, aucune étude sur la volatilisation de ces substances dans les bassins d'aération de station à boues activées n'a été trouvée.

4.2.2 *Compartiment boues*

Les PFAS à chaîne longue vont avoir tendance à se concentrer dans les boues, où ils vont rester relativement stables, par le mécanisme d'adsorption. Les boues d'épuration utilisées pour l'amendement des terres agricoles peuvent devenir une source secondaire de PFAS dans les sols [90] [76] [89]. Plusieurs études montrent que sous certaines conditions (notamment pH et teneur en matière organique des boues) les PFAS qu'elles contiennent vont progressivement être relargués [6] [95] [85].

A noter également que la plupart des traitements thermiques des boues ne sont pas suffisamment chauds pour espérer une dégradation thermique des PFAS (nécessité d'une température supérieure à 1100°C et idéalement supérieure à 1300°C) [86].

Les traitements actuellement mis en œuvre dans les stations d'épuration sont globalement inefficaces et ne permettent pas une réduction significative de la concentration en PFAS. Les PFAS à chaîne longue pourront néanmoins durant le traitement être réduits en PFAS à chaîne plus courte mais qui seront également plus stables et plus mobiles. Du fait de la dégradation de composés non-recherchés à chaîne longue, il arrive même d'avoir des taux de rendement négatifs pour les principaux PFAS en C4-C8.

Le partage des PFAS entre la phase liquide et la phase solide va dépendre de plusieurs facteurs mais on peut retenir 2 faits principaux :

- Plus la chaîne carbonée du PFAS sera longue plus il sera adsorbé sur les boues,
- Plus le milieu sera acide, plus la capacité d'adsorption des PFAS sur les boues sera forte.

5. Analyse et suivi des PFAS dans les matrices aqueuses et solides

De manière générale, le suivi des PFAS dans la matrice eau est mieux documentée que leur analyse dans les matrices solides (boues et sols). En effet, leur identification et quantification précises dans les matrices solides et plus spécialement dans les boues sont rendues difficiles car elles sont liées aux substances extracellulaires des boues [96].

Afin que l'analyse soit la plus précise et la plus juste possible, plusieurs procédures sont essentielles et cela tout au long du processus analytique qui comprend les étapes suivantes :

- Le prélèvement de l'échantillon,
- La conservation de l'échantillon,
- La préparation de l'échantillon,
- L'analyse instrumentale.

5.1. Le prélèvement et la conservation des échantillons

Le prélèvement et la conservation des échantillons sont des étapes très importantes dans l'analyse, celles-ci doivent être appropriées et doivent respecter certaines recommandations qui ont pour but de minimiser les pertes et d'éviter les contaminations.

5.1.1 Prélèvement et conservation des échantillons des eaux usées

Il est recommandé que les échantillons soient prélevés et conservés selon les normes et guides techniques européens dont les références sont listées ci-dessous :

- Eaux usées : FD T 90-523-2 Qualité de l'eau - Guide d'échantillonnage pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement - partie 2 : Échantillonnage d'eaux usées.
- Conservation des échantillons : NF EN ISO 5667-3 Qualité de l'eau – Échantillonnage – Partie 3 : Conservation et manipulation des échantillons d'eau.

Les matériaux et les outils de prélèvement et de stockage doivent aussi respecter certaines exigences, ces dernières sont regroupées dans le Tableau 34. Ces exigences sont relatives aux types de matériaux composant les outils de prélèvements et de stockage.

En effet certains matériaux peuvent contenir des PFAS qui peuvent être relargués dans l'échantillon prélevé. A l'inverse certains matériaux comme le verre sont connus pour leur pouvoir d'adsorption vis-à-vis des PFAS et peuvent donc adsorber une partie des PFAS éventuellement présents dans l'échantillon. Ces deux facteurs peuvent entraîner une répercussion directe sur la qualité du résultat analytique : faux positifs ou faux négatifs.

De la même manière, les conditions de stockage en termes de délais et de températures doivent être respectées afin de garantir la représentativité de l'échantillon en conservant ces propriétés physico-chimiques entre le moment de son prélèvement et son analyse.

Tableau 34 : Les types de matériaux recommandés et à éviter dans le cadre de la réalisation d'échantillonnage d'eaux usées [97]

Outils	Matériaux recommandés	Matériaux à éviter
Echantillonneur manuel	L'outil de prélèvement (perche, seau...) doit être en plastique (PVC, PEHD), en aluminium ou en inox	Seau téflon ou PTFE [98], [99]
Echantillonneur automatique	Polyéthylène haute densité (PEHD), polypropylène, PVC, nylon, acier inoxydable Silicone (tuyau d'écrasement des pompes péristaltiques)	Polytétrafluoroéthylène (PTFE), y compris le téflon et autres matériaux contenant des fluoropolymères [98], [99]
Décontamination	Eau et détergents disponibles dans le commerce avérés exempts de PFAS	Détergents tels que Decon 90
Contenants d'échantillons	Récipients en PEHD ou en polypropylène avec PEHD ou couvercles en polypropylène dans un double emballage de type Ziploc	LDPE ou bouteilles en verre, bouchons doublés de téflon
Stockage des Echantillons pour le transport	Glace ordinaire dans des sacs réutilisables à température <10°C, réception <48h	-
Vêtements	Vêtements en coton sans revêtement résistant à l'eau	Vêtements ou bottes avec Gore-Tex® ou autre synthétique résistant à l'eau et/ou matériaux résistants aux taches, matériau Tyvek, assouplissant
Livres de terrains marqueurs et stylos	Papier ordinaire en vrac, presse-papiers en métal, stylo à bille	Papier ou cahiers de terrain imperméables/traités, presse-papiers en plastique, imperméable à l'eau, marqueurs, Post-it et autres papiers avec adhésif
Produits de soins personnels	Les écrans solaires et les insectifuges devraient être 100% naturel pour minimiser la contamination croisée	Produits de soins personnels le jour du prélèvement : cosmétiques, hydratants, crème pour les mains, crème solaire et autres produits connexes, Insectifuge
Crépine / lest	Inox exclusivement	-

Afin de valider la méthode de prélèvement il est recommandé de réaliser des blancs (FD T 90-524 Contrôle qualité – Contrôle qualité pour l'échantillonnage et la conservation des eaux). En effet, le blanc est un contrôle qualité réalisé régulièrement lors de l'analyse dont le but est d'évaluer une éventuelle contamination de la chaîne de mesure pour un paramètre donné, et qui, le cas échéant, peut-être intégré dans le calcul du résultat final. C'est le résultat d'une analyse réalisée sur un échantillon représentatif ne contenant pas le composé à quantifier, et cela en mettant en œuvre le processus d'analyse dans sa globalité c'est-à-dire en traitant le blanc dans les mêmes conditions que les échantillons à analyser (même réactifs, mêmes quantités de produit et même équipements de préparation et d'analyse) [100].

Remarques

En plus des échantillonneurs manuels et automatiques, des échantillonneurs passifs peuvent être mis en œuvre [101],[102]. Les matériaux qui les constituent doivent respecter les mêmes recommandations que précédemment (matériaux en PE ou PEHD, Inox...etc.). Le déploiement d'échantillonneurs automatiques requiert une vigilance particulière quant aux matériaux qui les constituent. Ces derniers doivent répondre aux exigences techniques nécessaires pour le prélèvement des PFAS (Tableau 34).

En effet les échantillonneurs automatiques présentent un risque élevé de contamination croisée à cause des différents éléments qui constituent le dispositif de prélèvement, souvent fabriqués à partir de plastiques contenant des perfluorés (tubes, vannes, crépines, etc.). Ainsi, il est important de prendre l'habitude d'intégrer des réflexes de vérification des matériaux lorsqu'il s'agit des PFAS, et d'éviter de prendre machinalement du matériel classiquement employé pour l'échantillonnage des micropolluants.

Les équipements de protection individuelle (EPI) doivent être choisis exempts de PFAS. Lors de leur fabrication, des PFAS sont utilisés afin de les rendre étanches vis-à-vis de l'eau, des huiles et des saletés. Par conséquent si ces EPI n'existent pas sans PFAS, leur utilisation doit être consignée dans la fiche terrain.

Aussi, lors de la préparation de l'échantillonnage, il est important de :

- Privilégier des vêtements en coton,
- Appliquer les protections anti-moustiques ou antisolaire avant l'arrivée sur le lieu de prélèvement et de se laver les mains à l'eau et au savon juste après leur application,
- Porter obligatoirement des gants en nitrile.

Flaconnage

- Utiliser des flacons exclusivement en plastique (PEHD, PVC ou PET),
- Les volumes des contenants sont à identifier selon le laboratoire d'analyse mandaté (500 mL ou 2x 125 mL),
- Les flacons doivent être rincés trois fois au méthanol avant leur remplissage complet,
- Les flacons doivent être isolés dans des sacs et leur identification doit apparaître uniquement sur le sac.

Les échantillons collectés doivent être stockés à l'abri de la lumière et au frais à une température comprise entre 1 et 6 °C et peuvent être gardés ainsi jusqu'à 28 jours. Autrement, les échantillons doivent être stockés à -20 °C et jusqu'à 90 jours en attendant leur préparation [103].

5.1.2 Prélèvement et conservation des échantillons dans les sols et les boues

Les recommandations établies pour les prélèvements d'eau usée citées précédemment sont également valables pour les prélèvements de sédiments (sols et boues).

Pour cette matrice, il est recommandé en plus de sous-échantillonner une fraction de l'échantillon qui n'a pas été en contact avec l'outil de prélèvement (carotteuse, pelleuse, tarière). Cela, dans le but de prévenir contre tout risque de contamination liée au matériel de prélèvement [97].

Les échantillons de sols, peuvent être gardés jusqu'à 90 jours, si ces derniers sont stockés à une température comprise entre 0 à 6 °C ou à - 20°C sous réserve que l'extraction de l'échantillon peut être réalisée dès que possible si l'acide perfluoro-3,6-dioxaheptanoic

(NFDHA) est un analyte important à suivre lors d'un projet donné. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que certains sols peuvent présenter une croissance microbienne lorsqu'ils sont stockés à une température comprise entre 0 et 6 °C [103].

Les mêmes conditions de stockage peuvent être adoptées pour les échantillons de boues. Cependant, il est préférable de les stocker à – 20 °C car une activité microbologique peut avoir lieu dans ces échantillons s'ils sont stockés à une température comprise entre 0 et 6 °C et entraîner des gaz susceptibles d'entraîner l'échantillon hors du récipient et de dégager de mauvaises odeurs lorsque ce dernier est ouvert [103].

Contrairement à la matrice eau, le flaconnage en verre peut être utilisé. Dans ce cas, il est recommandé de choisir un pot en verre brun sans joint en Téflon dont la contenance est à définir selon les exigences du laboratoire d'analyse mandaté. Aussi, il est conseillé de réaliser un triple rinçage au méthanol du contenant avant son remplissage [97].

5.2. Les modalités et fréquences de prélèvement

Les modalités et les fréquences d'échantillonnage sont à mettre en œuvre selon :

- Les recommandations des référentiels des normes en vigueur,
- Les obligations réglementaires,
- Les objectifs à viser lors d'une étude.

5.2.1 Les modalités et fréquences de prélèvement des échantillons aqueux

De manière générale, le prélèvement d'un échantillon d'eau usée dans les rejets de stations d'épuration ou de boues doit être représentatif du fonctionnement normal de l'installation.

Selon l'arrêté du 20 juin 2023, de la réglementation française, relatif à l'analyse des PFAS dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) [60], il est recommandé que :

- Les prélèvements soient réalisés par un organisme ou un laboratoire agréé ou, s'il n'existe pas d'accréditation pour le paramètre mesuré, par un organisme ou laboratoire accrédité par le Comité français d'accréditation ou par un organisme signataire de l'accord multilatéral pris dans le cadre de la coordination européenne des organismes d'accréditation,
- Les prélèvements soient effectués au(x) point(s) de rejet aqueux avant toute dilution avec d'autres effluents. Les rejets d'eaux pluviales non souillées ne sont pas concernées,
- Les prélèvements soient réalisés sur une durée de 24 heures. Dans le cas où il est impossible d'effectuer un prélèvement proportionnel au débit de l'effluent, un prélèvement asservi au temps ou des prélèvements ponctuels, si la nature des rejets le justifie, sont réalisés.

Il est également recommandé que les prélèvements soient réalisés une fois par mois sur une période de trois mois consécutifs.

La fréquence et les points de prélèvements des échantillons peuvent dépendre des exigences réglementaires, des objectifs fixés lors d'une étude donnée ainsi que l'étendue et la durée de l'étude.

Pour la réalisation des campagnes relatives à la recherche de substances dangereuses dans les eaux (RSDE), il est recommandé de réaliser la campagne de prélèvement par temps sec sur différentes périodes de l'année de manière à couvrir les quatre saisons [104]. Cette campagne concerne les stations d'épuration supérieures à 10 000 EH, dure une année et prévoit six prélèvements sur l'année. Ainsi il est recommandé de prévoir :

- Une campagne au printemps,
- Deux campagnes en été de préférence hors périodes scolaires s'il n'y a pas d'activités touristiques particulières sinon, pendant,
- Une campagne à l'automne,
- Deux campagnes en hiver (hors périodes de ressuyage de nappe).

Lors de ces campagnes, il est recommandé de réaliser un prélèvement représentatif en amont et en aval des stations d'épurations retenues tout en tenant compte des temps de séjour du dispositif épuratoire.

Certains PFAS ont été intégrés dans la liste des substances à rechercher lors des campagnes RSDE [105], par conséquent ces recommandations techniques restent valables. Cependant, il est important d'apporter une vigilance particulière aux types de matériaux qui composent les outils de prélèvement et de s'assurer que ces derniers répondent aux exigences techniques nécessaires pour le prélèvement des PFAS.

5.2.2 Les modalités et fréquences de prélèvement des échantillons de boues et de sols

Les points de prélèvement des boues et des sols dépendent des objectifs de l'étude, des périmètres étudiés et des budgets alloués à la réalisation.

Si l'objectif est de réaliser une étude d'impact environnemental ou de mobilité des substances entre différentes matrices environnementales dans une filière de traitement d'eau usée, alors des prélèvements à chaque étape de traitement peuvent s'envisager afin de mieux appréhender les résultats.

Si l'objectif est d'évaluer la conformité des boues avant épandage, il est recommandé alors de prélever un échantillon de boue dans le silo, ou la benne destinée à la valorisation agricole ou le compostage.

Dans le cas des boues liquides : le prélèvement est à réaliser dans le bassin d'aération après 30 minutes d'aération afin de garantir un bon brassage du réacteur. Trois à cinq prélèvements ponctuels sont à réaliser sur la journée et conservés dans un contenant adéquat au frais à 3 ± 2 °C.

Dans le cas de boues solides : le prélèvement est à réaliser en différents points de stockage. Trois à cinq prélèvements moyennés spatialement (plan et profondeur) sont à prévoir [104].

Si l'objectif est d'évaluer la pollution des sols aux PFAS, il est alors recommandé de définir le périmètre du terrain étudié et de réaliser des prélèvements moyennés spatialement de telle manière à garantir une représentativité de l'échantillon.

Il est conseillé de réaliser un prélèvement de boues sur le même schéma de prélèvement que les échantillons d'eau. L'idéal serait de réaliser un prélèvement de boues en amont

et en aval de la filière de traitement, voire à chaque étape de la filière de traitement en fonction de sa complexité et des moyens techniques et financiers pouvant être mis en œuvre.

Autrement, un seul point de prélèvement en aval de la filière boue peut être considéré. Dans ce cas il est recommandé d'opérer une analyse des adjuvants utilisés comme les polymères de manière à en connaître les apports en micropolluants.

5.3. Les méthodes d'échantillonnages adoptées dans différentes études

Une équipe de chercheurs en Suisse [106], a mené une étude sur la caractérisation et l'identification des sources de PFAS dans les boues de stations d'épuration. Pour ce faire :

- 45 stations d'épurations ont été échantillonnées, la plupart équipées de digesteurs, dont 41 stations ont une capacité de traitement supérieure à 10 000 EH et 4 stations inférieures à 10 000EH.
- L'échantillonnage a été réalisé entre août et décembre 2011 sur 3 campagnes de prélèvements réparties comme suit :
 - 3 échantillons prélevés dans 21 stations d'épuration,
 - 2 échantillons prélevés dans 22 stations d'épurations,
 - 1 échantillon prélevé dans une station d'épuration.

Chaque prélèvement a été espacé du suivant d'au moins un mois afin de prendre en compte les éventuels apports des effluents entrants. Ainsi, les différents prélèvements ont été réalisés sur des boues d'épuration stabilisés en anaérobiose et digérées pendant 20 à 30 jours. Ces boues contenaient 95 % d'eau. Lorsque la station d'épuration ne disposait pas de digesteur, le prélèvement des boues était réalisé sur des boues aérobies.

Au Pays-Bas, une campagne de surveillance des PFAS dans des effluents entrants et sortants ainsi que sur les boues de stations d'épuration a été réalisée par la fondation pour la recherche appliquée sur l'eau (STOWA) [107]. Pour ce faire, 8 stations d'épuration ont été échantillonnées, ces dernières ont été choisies selon le type et la proportion des eaux usées traitées. Deux types d'eaux usées ont été considérées, des eaux usées industrielles et des eaux usées domestiques. L'objectif étant de quantifier la part des concentrations en PFAS apportés par ces deux types d'eaux usées. Ainsi le choix s'est porté sur :

- Des stations d'épuration traitant une proportion importante d'eaux usées industrielles,
- Des stations d'épuration traitant à la fois des eaux usées domestiques et industrielles,
- Des stations d'épuration traitant presque exclusivement des eaux usées domestiques.

L'échantillonnage a été réalisé sur les trois points suivants :

- 1 échantillon par jour d'eau prélevé en entrée de station d'épuration,
- 1 échantillon par jour d'eau prélevé en sortie de station d'épuration,
- 1 échantillon par jour de boue prélevé après traitement (boue sortante).

En entrée et en sortie de chaque station d'épuration, des échantillons proportionnels au débit sur 24 heures ont été prélevés pendant neuf jours consécutifs (totalisant neuf échantillons en entrée et en sortie pour chaque station d'épuration) afin d'avoir un aperçu sur la variabilité des concentrations entrantes en PFAS et de l'efficacité de leur élimination.

Même si la plupart des recommandations préconisent des prélèvements exclusivement par temps sec, l'équipe qui a mené cette étude a fait le choix de poursuivre l'échantillonnage pendant les épisodes pluvieux afin d'obtenir des informations sur les concentrations entrantes en PFAS et l'efficacité de leur élimination dans des conditions de débit par temps sec et par temps pluvieux.

Quant à l'échantillonnage des boues sortantes, celui-ci a été réalisé sur la période des neuf jours d'échantillonnage par des prises d'échantillons ponctuels. Dans la plupart des cas, trois échantillons de boues par station d'épuration ont été prélevés sur différents jours et analysés afin d'obtenir une indication des teneurs de concentrations présentes dans les boues.

Lors de cette campagne de surveillance, il a été décidé de réaliser des analyses sur des échantillons spéciaux susceptibles de participer à l'apport des PFAS, et cela dans le but d'élargir la compréhension et la cartographie des sources potentiels de PFAS. Ainsi les échantillons suivants ont été prélevés :

- Matériaux tamisés en entrée d'une station d'épuration, il s'agit de matières fibreuses composées principalement de résidus de papiers hygiéniques. Trois échantillons ponctuels de ces matériaux tamisés ont été analysés. Les prélèvements ont été réalisés durant la période des 9 jours, chacun un jour différent.
- Trois échantillons d'eaux industrielles suspectées de contenir des PFAS et rejetées dans une des stations d'épuration échantillonnées. Il s'agit d'eaux usées provenant d'une entreprise d'énergie et d'élimination des déchets et composées d'eaux usées provenant de l'incinération des boues, de l'incinération des ordures ménagères et des déchets hospitaliers ainsi que des eaux de drainage provenant d'une installation de stockage des déchets. Les échantillons de ces différentes eaux sont considérés distinctement, leur prélèvement a été réalisé de la même manière que précédemment, c'est-à-dire, proportionnel au débit et sur 24 heures.
- Les eaux usées de fabrication de la société Chemours qui utilise des composés PFAS. Ces échantillons proportionnels au débit ont été prélevés sur 24 heures après leur traitement par osmose inverse et adsorption sur charbon actif.
- Quelques échantillons de boues entrantes.

Dans le cadre du projet PROMISCES des campagnes de surveillance de micropolluants organiques incluant des PFAS dans des stations de traitement d'eaux usées équipées de technologies de traitement avancés ont été réalisées [102] Pour ce faire :

5 stations d'épurations ont été échantillonnées en Allemagne, en Suisse et en Suède. Ces stations étaient équipées de technologies de traitement avancés comme suit :

- 2 stations avec ozonation et post-traitement biologique,
- 2 stations avec charbon actif en poudre suivi d'une filtration,
- 1 station combinant l'ozonation et la filtration sur charbon actif en grains.

Ces stations d'épuration ont été sélectionnées sur la base des critères suivants :

- La station de traitement des eaux usées doit être en fonctionnement depuis au moins un an,
- Les stations doivent viser l'élimination de médicaments tel que prévu dans la révision de la directive sur les eaux usées (par exemple ozonation, charbon actif),
- Les stations équipées de traitements membranaires sont exclues,
- Les stations d'épuration sélectionnées doivent traiter principalement des eaux usées municipales et disposer de différentes technologies de traitement des eaux usées,
- Géographiquement, les stations sélectionnées doivent être situées dans l'Union Européenne ou en Suisse.

Trois campagnes d'échantillonnage ont été menées dans chaque station d'épuration. Les échantillons ont été prélevés sur 24 heures à l'exception d'une station d'épuration où un échantillonnage ponctuel a été réalisé.

Dans le cadre de cette étude, les prélèvements des échantillons ont été considérés en entrée et en sortie des traitements avancés et/ou sur les effluents des post- traitements biologiques, selon les traitements mis en œuvre au niveau de chaque station.

La mise en place d'une campagne d'échantillonnage dans des stations de traitement d'eaux usées dépend des objectifs de l'étude et des moyens matériels et humains qui peuvent être mis en œuvre. Ainsi, les critères de sélection des sites étudiés varient selon les études. De manière générale, les critères suivants peuvent être considérés :

- La capacité de traitement de la station,
- Les types des eaux usées traitées,
- Les procédés de traitement disponibles sur la station,
- La situation géographique de la station.

Pour le prélèvement d'eau : il semblerait que des échantillons proportionnels au débit sur 24 heures pendant plusieurs jours consécutifs soient le plus approprié en termes de représentativité de l'échantillon.

Pour le prélèvement des boues : il est conseillé de réaliser des prélèvements d'échantillons moyennés spatialement sur la même période de prélèvement que les eaux.

5.4. La préparation des échantillons

Avant de procéder à l'analyse instrumentale, les échantillons des matrices eaux et boues contenant des PFAS sont soumis généralement à une extraction en phase solide (SPE)[101]. Cette phase solide est en général contenue dans des cartouches spécifiques. Le principe de cette technique se base sur la différence d'affinité entre les constituants de l'échantillon (analytes et interférents) pour une phase solide (sorbant). Cette affinité permet de séparer les analytes cibles des interférents.

Ainsi, cette technique permet l'extraction, le nettoyage et la concentration des analytes avant leur quantification. Elle permet également de s'affranchir des interférences dues à la matrice.

Cette étape est rapide et facile à réaliser, elle dure en moyenne une trentaine de minutes et peut aussi être automatisée. Elle comprend les étapes suivantes :

- Conditionnement de la cartouche avec un solvant,
- Passage de l'échantillon sur la cartouche (SPE) et rétention des analytes et des impuretés,
- Lavage et élution des analytes dans une phase liquide pour analyse.

5.5. Les techniques d'analyses des PFAS dans les eaux usées et les boues

5.5.1 Analyse des PFAS par chromatographie liquide ou gaz couplé à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS ou GC-MS/MS)

Le développement de cette méthode d'analyse est réalisé selon les référentiels des normes en vigueur.

Cette méthode permet de mettre en évidence des composés poly- et perfluorés prédéfinis dans une liste. Ces listes sont définies de manière à répondre aux exigences réglementaires du pays.

La partie de chromatographie liquide (LC) de cette technique peut être identifiée sous les dénominations suivantes [101]:

- HPLC : High pressure liquid chromatography,
- UHPLC : Ultra-high performance chromatography,
- UPLC : Ultra-performance liquid chromatography.

Cette technique analytique permet une identification précise et spécifique des molécules ciblées. Cette identification est possible après extraction de l'échantillon et séparation des analytes (composés à analyser) par chromatographie liquide ou gaz (pour les molécules neutres et volatiles) et une détection par la spectrométrie de masse [101], [108], [109], [110].

Afin de quantifier les molécules ciblées, des solutions étalons (standards analytiques) spécifiques à chaque molécule sont nécessaires, par conséquent tous les PFAS ne peuvent pas être analysés via cette technique car tous les standards analytiques ne sont pas disponibles.

Cette technique permet d'obtenir des limites de quantifications basses, de l'ordre du ng/L pour les eaux et de l'ordre du µg/kg pour les matrices solides. Cependant elle est longue à développer et très coûteuse en termes de moyens matériels et humains [101].

Le Tableau 35 et le Tableau 36 donnent un aperçu des techniques analytiques et de préparation des échantillons pour l'analyse des PFAS dans différentes matrices d'eaux et de boues, avec les taux de recouvrement (%) et les limites de détection (LOD) et de quantification (LQ) en ng/L pour les eaux en ng/g pour les boues.

Tableau 35 : Résumé du processus analytique pour l'analyse des PFAS présents dans différentes matrices d'eau [101]

Matrix	Extraction and Pretreatment	Analysis	Recoveries	LOD	LOQ
Surface and underground water	Oasis WAX cartridge SPE online	High pressure liquid chromatography–mass spectrometry (HPLC-MS)	80–120	N/A	0.2–5
Seawater	Oasis WAX cartridges SPE	Ultra-high performance liquid chromatography (UHPLC-MS)	Above 50 except PFBA in seawater (<10)	0.001–0.331	N/A
Surface water	µSPE cartridge	UHPLC-MS	86–111	0.29–6.6	N/A
Estuarine water	Waters Oasis PRiME HLB cartridges SPE	Ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UHPLC-MS/MS)	78.5–112.6	0.48–1.68 ^a	1.7–5.4 ^a
Surface water and rainwater	Waters Oasis HLB cartridges SPE	Ultra-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS)	72–98	0.02–0.03	0.04–0.06
Surface water	WAX SPE cartridges	LC-MS/MS	68.5–118	0.5–10	2–20
Groundwater	Oasis WAX cartridges SPE	LC-MS/MS	73–137	0.03–0.06	0.03–1.27
Surface water and groundwater	Oasis WAX cartridges SPE	LC-MS/MS	83–107	0.1–5.5	0.6–26
Seawater	Oasis [®] cartridge SPE and Envi-Carb [™] cartridge	LC-MS/MS	63.2–112.9	0.01–0.08	0.03–0.24
Surface water	Derivatization using (S)-1-PhEtCl	GC-MS	92	0.050–0.15	N/A
Surface water	Strata-X cartridge SPE	Liquid chromatography triple quadrupole mass spectrometer (LC-QqQ-MS)	44–100	N/A	0.01–2.00
Groundwater	Water Oasis HLB Plus Short cartridges SPE	UPLC-MS/MS	70–130	0.02–0.03	0.04–0.06

Tableau 36 : Résumé du processus analytique pour l'analyse des PFAS présents dans différents types de sols et de sédiments [101]

Matrix	Extraction and Pretreatment	Analysis	Recoveries	LOD	LOQ
Sea and river sediment and soil	Oasis® cartridge SPE and ENVI-Carb™ cartridge	LC-MS/MS	78.9–120	0.002–0.042 _c	0.006–0.1 ^b
Sediment	Extraction with acetic acid (AcOH) and MeOH; cleaning up by Strata-X cartridge SPE	LC-QqQ-MS	44–100	N/A	0.04–8.00
Soils	Water Oasis HLB Plus Short cartridges SPE	UPLC-MS/MS	70–130	0.02–0.50	0.04–0.60
Soils	Oasis WAX cartridges, MeOH as solvent	LC-MS	52–167	0.100–400 ^c	0.01–0.30 ^b
Marine sediments	ENVI-Carb cartridges SPE, MeOH as solvent	LC-MS	96–127.1	0.002–0.018	0.004–0.054
Marine sediment	Derivatization dansyl chloride (DNS) in ACN under catalysis of 4-(dimethylamino)-pyridine (DMAP) and WAX and silica cartridges clean-up	Liquid chromatography–electrospray ionization–mass spectrometry (LC-ESI-MS) combined with CID-MS/MS	67–83	0.006–0.016	0.017–0.060
Soils	LLE using acidified MeOH	HR-CS-GFMS High performance liquid chromatography–electrospray ionization tandem mass spectrometry (HPLC-ESI-MS/MS)	79–117	3.43	10.30
Sediment	MeOH-based extraction, Oasis WAX SPE cartridges	High performance liquid chromatography–electrospray ionization tandem mass spectrometry (HPLC-ESI-MS/MS)	86.7–113	0.013–0.089 _a	N/A
Sediment	Pre-treatment with Oasis-HLB SPE and MeOH solvent	HPLC-ESI(-)-MS/MS	72–101.9	N/A	0.01–0.08 ^b
Sediment	ACN and MeOH as the extraction solvent	UPLC-MS/MS	80–115	0.02–1.11 ^a	N/A

5.5.2 Analyse des PFAS via l'analyse du Fluor organique global

Cette méthode d'analyse n'est pas sélective, elle consiste à réaliser l'analyse du Fluor organique global par combustion couplée à une chromatographie ionique (CIC). Elle permet de détecter tous les composés extractibles ou adsorbables contenant du Fluor organique :

- Pour les sols : cette méthode est appelée EOF pour Extractible Organo Fluorine. Elle consiste en une extraction par un solvant organique suivi d'une analyse par CIC.
- Pour les eaux : cette méthode est appelée AOF pour Adsorbable Organo Fluorine. Elle consiste en l'adsorption des substances organique sur du charbon actif suivi d'une analyse par CIC.

Contrairement à la LC-MS/MS ou la GC-MS/MS, cette technique est non sélective, rapide et peu coûteuse [97]

En France l'analyse de l'indice AOF est obligatoire dans les eaux usées de certaines installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) avec une LQ exigée à 2 µg/L et cela depuis l'arrêté du 20 juin 2023 [60].

5.5.3 Analyse des PFAS via une oxydation forcée (TOP)

Cette analyse appelée TOP pour Total Oxidisable Precursors, consiste à oxyder l'échantillon puis l'analyser via la LC-MS/MS. Cette oxydation a pour but de simuler la

dégradation de l'échantillon dans l'environnement en transformant les composés poly-fluoroalkylés (précurseurs) en per-fluoroalkylés dont certains présentent des risques avérés pour l'homme [108], [111].

Cette technique peut mettre en évidence une augmentation de la concentration en PFAS et par conséquent un risque supplémentaire lié à la dégradation de l'échantillon. Elle a l'avantage de mettre en évidence de potentiels risques futurs pour l'homme. De ce fait, elle peut être complémentaire aux méthodes précédentes [97].

5.5.4 Détection des PFAS par différents capteurs

Les méthodes analytiques présentées précédemment sont des méthodes analytiques de laboratoire qui nécessitent une longue préparation des échantillons, du personnel qualifié et des coûts importants. De plus, ces méthodes ne sont pas adaptées à une application sur le terrain. C'est pourquoi les recherches se tournent vers le développement de méthodes complémentaires pour la détection rapide et peu coûteuse des PFAS sur le terrain.

Cette voie analytique s'intéresse à la détection des PFAS via le développement notamment de capteurs optiques et électrochimiques, rendant la détection des PFAS plus simple et plus rapide [112].

Grapheal, une startup « Deeptech », spécialisée dans les biocapteurs, et le laboratoire EDYTEM, une unité mixte de recherche CNRS/Université de Savoie-Mont Blanc, ont mis au point au sein de leur laboratoire commun « Fluorograph », des capteurs de mesure électrochimique capables de détecter les PFAS les plus communs. Les premiers essais ont montré des seuils de détection du PFOA de l'ordre de 300 ng/L [113]. Ce seuil de détection est inférieur au seuil imposé par la réglementation de l'union européenne fixé à 500 ng/L pour le total des PFAS dans l'eau potable, mais reste environs 10 fois supérieur aux seuils de détections offerts par les méthodes de laboratoires.

Le défi est de pouvoir développer des capteurs capables de détecter un nombre important de PFAS à de faibles concentrations. Ainsi, il est intéressant de garder à l'esprit ces méthodes au fur et mesure que la recherche et le développement des capteurs de PFAS progresse.

Le Tableau 37 récapitule les différentes techniques analytiques avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 37 : Récapitulatif des techniques analytiques des PFAS avec leurs avantages et inconvénients

Méthode analytique	Avantages	Inconvénients
LC-MS/MS ou GC-MS/MS	Quantitative. Précise. LQ basses.	Longue préparation de l'échantillon. Nécessite des étalons. Nécessite du personnel qualifié. Coûteuse en termes de moyens matériels et financiers.
AOF/EOF	Peu coûteuse.	Semi-quantitative. Tous les PFAS ne sont pas extractibles comme les PFAS à chaînes courtes.

		Résultat en équivalent fluorures total.
TOP	Participe à l'évaluation des risques. Complémentaire aux deux techniques précédentes.	Semi quantitative, Ne peut être considérée isolément.
Capteurs	Simple à mettre en œuvre. Ne nécessite pas du personnel qualifié. Mesure sur le terrain. Peu coûteux une fois déployés.	En voie de développement, LQ élevées

6. Mise en œuvre de campagnes de suivi des PFAS dans les eaux usées et les boues de stations d'épuration

Les pays qui ont mis en place une politique d'identification des polluants émergents ont souvent d'abord cherché les PFAS dans le milieu naturel et l'eau potable, puis ont cherché à identifier les sources en réalisant des campagnes de suivi sur les effluents industriels et les effluents urbains [81] [66] [76] [55] [57].

Actuellement, les pays se dotent de plan d'actions nationaux de lutte contre les PFAS. Ces plans visent généralement [76] [59] [114] [55]:

- La restriction des usages et l'interdiction de certains PFAS afin de limiter les sources d'exposition,
- Le **lancement, tous les 3-4 ans, d'une campagne d'inventaire** [66] [104] afin d'inventorier, de cartographier et mieux comprendre la propagation de la présence des PFAS en visant en particulier les rejets industriels, les stations d'épuration, les points de captage d'eau potable et les milieux naturels,
- La **définition de seuil de significativité** de la présence par substance ou par groupe de substance en fonction des supports étudiés,
- La mise en place d'un **suivi renforcé si une présence importante de PFAS est relevée**,
- La mise en place d'**actions de limitation des rejets et de l'exposition** par la mise en place de traitements complémentaires sur les stations de traitement des eaux, la réalisation de diagnostics amont sur les réseaux d'eau et l'interdiction de l'épandage des boues contenant des PFAS.

Le protocole de surveillance est donc différent en fonction des objectifs de la campagne de surveillance.

Les stations d'épuration sont des sites de mesures pertinents car elles reçoivent une part importante de la pollution émise par un bassin de population desservie par un réseau d'assainissement. Un suivi PFAS sur ces installations permet donc de recenser les zones présentant des concentrations importantes en PFAS, d'identifier potentiellement les sources et d'avoir une bonne vision de l'évolution de la situation. En cas d'une présence importante de PFAS, la mise en place d'un plan d'actions spécifique permet également de limiter fortement le risque de propagation de la pollution [104] [89].

Les campagnes nationales réalisées dans des pays tels que les Etats Unis, les Pays Bas, la Chine, l'Allemagne, l'Australie, la France se sont d'abord focalisées, selon une logique exploratoire, sur les plus grandes stations, c'est à dire celles de taille supérieure à 150 000 EH (cette taille est également celle reprise dans la DERU révisée pour l'obligation de suivi des micropolluants) [38], ou situées à proximité d'une source de contamination connue, le plus souvent dans le cadre de recherches universitaires. Ces 1ères études ont permis d'avoir une idée des ordres de grandeur de la présence de PFAS et de définir 3 concepts importants afin de comprendre le mode de sélection des sites à surveiller.

➤ **Les sites prioritaires**

Les sites prioritaires peuvent être définis comme [55] [8]:

- Des sites industriels avec un usage connu, actuel ou passé, ou probable de PFAS (en lien avec l'activité)
- Des sites où des mousses extinctrices ont été (possiblement) utilisées : base militaire, aéroport, centre d'entraînement, site de stockage ou de production d'hydrocarbures,
- Des lieux de traitement et de stockage des déchets (actifs ou anciens),
- Des stations d'épuration d'une taille supérieure à 50 000 ou 150 000 EH selon les cas,
- Des zones ou un hotspot a été mesuré dans l'environnement (cf Forever pollution project)

➤ **La (non) significativité des analyses**

Valeur au-delà desquelles le résultat d'une analyse peut conduire au dépassement d'une valeur limite (seuil d'alerte, limite réglementaire) et/ou servir au déclenchement d'actions (voir la partie 6.5).

➤ **Les hotspots**

On parle de « hot spot » lorsque la concentration de PFAS détectée sur un site atteint un niveau que les experts estiment dangereux pour la santé (et donc largement supérieure aux seuils de significativité). Cette définition peut néanmoins varier selon les seuils de danger considérés, les substances suivies, ou le support d'analyse. Par exemple, selon Forever Pollution Project un site peut être considéré comme un hotspot quand une concentration de 100 ng/L de la somme des PFAS dans l'eau superficielle continentale ou l'eau souterraine est mesurée [15].

Les hotspots sont souvent situés à proximité ou en aval de "sites prioritaires".

Il est également important de noter que les révisions de la directive EDCH [33], la DCE-NQE [35] et la DERU [38] vont également fortement influencer les modalités des programmes de surveillance qui seront mis en place/adaptés afin de répondre aux nouvelles règles.

6.1. Définition des sites cibles

La définition des sites cibles à intégrer dans une campagne de suivi peut dépendre de plusieurs critères. Pour les stations d'épuration, il est courant d'appliquer une sélection en fonction de la taille de la station d'épuration ou de l'agglomération d'assainissement exprimée en Equivalent Habitant (EH) et/ou en fonction de la sensibilité du milieu aux points de rejet. Les seuils de sélection par la taille se basent en général sur des seuils réglementaires le plus souvent issus de :

- La DERU avec des seuils sur les tailles d'agglomération d'assainissement de 2000 EH (seuil bientôt abaissé à 1200 EH), 10 000 EH et 150 000 EH [38].

- La réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement, en Wallonie, les seuils pour les stations d'épuration des eaux résiduaires urbaines sont [115] :
 - Classe 1 : capacité nominale de moins de 100 EH,
 - Classe 2 : capacité nominale comprise entre 100 EH et 50 000 EH,
 - Classe 3 : capacité nominale supérieure à 50 000 EH.

Les campagnes d'inventaires réalisées en France (campagne RSDE) [104] et au Royaume Unis (CIP 3) [66] imposent le seuil de 10 000 EH pour le suivi des micropolluants dont certains PFAS. Le seuil de 10 000 EH est également repris dans la directive ERU révisée [38] pour l'obligation de suivi des micropolluants si l'analyse de risques est positive (suivi obligatoire pour les stations de plus de 150 000 EH). Les campagnes de suivi réalisées aux Etats Unis ont également portées sur des stations de plus de 10 000 EH.

Les campagnes de suivi des PFAS aux Etats Unis ont confirmé la présence de ces derniers dans la plupart des effluents et des boues des grandes stations d'épuration (> 150 000 EH) et une présence fréquente avec des concentrations variables dans les stations de taille moyenne [71] (taille comprise entre 10 000 et 150 000 EH). Par exemple, en France, dans le cadre de la campagne RSDE Eaux usées de 2022, le PFOS a été quantifié dans 20% des analyses et a été à l'origine de 22% des dépassements des seuils de significativité²⁴ et concerne toute taille de station [4] [88].

D'autres critères de sélection peuvent également être appliqués afin de constituer/compléter la liste des sites cibles. Les critères suivants peuvent être utilisés :

- Présence d'une concentration importante en PFAS connue ou supposée sur le bassin versant de la station faisant le lien avec les concepts de hotspot et de sites prioritaires,
- Identification d'une concentration importante en PFAS lors d'une campagne de surveillance précédente sur les boues ou l'eau en entrée/sortie (dépassement d'un seuil de significativité),
- Demandes spécifiques d'une autorité publique ou d'un institut de recherche,

Pour la Wallonie, une proposition de liste de sites cibles basée sur les pratiques des pays voisins pourrait être la suivante :

- Liste principale : toutes les stations d'une taille supérieure à 50 000 ou 150 000 EH. Ce seuil pourrait être adapté selon les ambitions et le contexte locale.
- Liste complémentaire : tous les sites répondant à au moins à un des critères suivants et ne figurant pas déjà sur la liste principale :
 - Présence sur le bassin de la station d'un hotspot (avec un dépassement des seuils défini par la directive EDCH dans l'eau potable ou par la DCE-NQE sur la somme de 24 PFAS en MA ou les valeurs MA/CMA pour le PFOS),
 - Station identifiée dans le cadre de l'analyse de risques de la DERU révisée,
 - Présence sur le bassin de la station d'un site prioritaire,
 - Présence sur le bassin d'un site avec un permis de rejet citant les PFAS,
 - Ajout à la demande d'une autorité de santé,
 - Présence "significative" de PFAS dans un lot de boues destinée à la valorisation agricole (voir partie 6.5),

²⁴ Seuil basé sur la valeur de la directive NQE de 0,65 ng/L en moyenne annuelle (MA) pour le PFOS

- Présence “significative” de PFAS en entrée/sortie (voir partie 6.5) mesurée lors de la campagne d’état des lieux de 2024.

6.2. Quelles molécules suivre ?

L’inventaire bibliographique réalisé, couplé à la faisabilité analytique actuelle dans les laboratoires d’analyses, permet d’établir la liste des molécules répertoriées dans le tableau 38. Soit :

- La liste des 28 PFAS initialement identifiées par la SPGE,
- Le Perfluorooctane sulfonamide (PFOSA),
- L’acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique (6:2 FTS),
- L’acide 1H,1H,2H,2H-Perfluorodécane sulfonique (8:2 FTS),
- Le Bis[2-(perfluorooctyl)ethyl] phosphate (8:2 diPAP),
- L’acide trifluoroacétique (TFA).

Tableau 38 : Liste des molécules relevées dans la littérature

MOLECULE	NOM COMPLET	CAS
PFBA	Acide perfluorobutanoïque	375-22-4
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	2706-90-3
PFBs	Acide perfluorobutane sulfonique	59933-66-3
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque	307-24-4
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque	375-85-9
PFHxS	Acide perfluorohexane sulfonique	3871-99-6
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	335-67-1
PFNA	Acide perfluorononanoïque	375-95-1
PFOS	Acide perfluorooctane sulfonique	2795-39-3
PFDA	Acide perfluorodécanoïque	335-76-2
PFDODA	Acide perfluorododécanoïque	307-55-1
PFHpS	Acide perfluoroheptane sulfonique	375-92-8
PFTrDA	Acide perfluorotridecanoïque	72629-94-8
PFUNDA	Acide perfluoroundécanoïque	2058-94-8
PFUDS	Acide perfluoroundécane sulfonique	441296-91-9
PFTrDS	Acide perfluorotridecane sulfonique	174675-49-1
PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	474511-07-4
PFDS	Acide perfluorodécane sulfonique	335-77-3
PFPeS	Acide perfluoropentane sulfonique	2706-91-4
PFDoS	Acide perfluorododécane sulfonique	79780-39-5
PFTeDA	Acide perfluorotétradécanoïque	376-06-7
PFHxDA	Acide perfluorohexadécanoïque	67905-19-5
PFODA	Acide perfluorooctadécanoïque	16517-11-6
ADONA	Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	9190005-14-4
C604	Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid	1190931-27-1

GenX	Acide 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy) propanoïque	13252-13-6
6:2-FTOH	2-perfluorohexyl ethanol (6:2)	647-42-7
8:2-FTOH	2-perfluorooctyle ethanol (8:2)	678-39-7
PFOSA	Perfluorooctane sulfonamide	754-91-6
6:2 FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonique	27619-97-2
8:2 FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluordécane sulfonique	27619-96-1
8:2 diPAP	Bis[2-(perfluorooctyl)ethyl] phosphate	678-41-1
TFA	Acide trifluoroacétique	76-05-1

Cette liste comprend 5 PFAS supplémentaires, par rapport à la liste initiale dressée par la SPGE. En effet, certains considèrent pertinent de suivre le PFOSA, le 6:2 FTS, le 8:2 FTS, le TFA et le 8:2 diPAP. Ces molécules sont suivies dans certains pays car typiques d'un usage particulier. Pour rappel le PFOSA, produit de substitution des PFCA et des PFSA, est suivi au Danemark et en Australie. Alors que les FTS et les diPAP sont suivis aux Etats Unis et que des travaux de thèse alertent sur leur émergence [9].

Quant aux TFA, produits de dégradation finaux de PFAS, et de nombreuses substances fluorées, ils sont soumis à une attention particulière et en forte expansion de la part des acteurs du domaine. Bien qu'ils soient considérés comme des métabolites non-pertinents dans la DCE, c'est parce que leur toxicité est très peu documentée. Ainsi, l'analyse de l'acide trifluoroacétique (TFA) sera réalisée lors de la campagne de screening. La pertinence de l'intégrer dans un suivi régulier sera évaluée selon les résultats obtenus.

L'analyse de l'indice AOF est souvent préconisée dans le suivi des rejets industriels. Son application au suivi sur des rejets aqueux issus de stations d'épuration est discutable. Ce paramètre serait un indicateur de la présence de PFAS adsorbables à chaîne longue. Son analyse pourrait s'envisager en complément sur des sites présentant une concentration élevée en PFAS, liée à des PFAS à chaîne longue. Son analyse entraîne un coût analytique supplémentaire d'environ 150 euros par échantillon.

Les LQ pratiquées par les laboratoires d'analyses sont consultables dans le détail dans l'annexe 03. Celles-ci varient selon la substance analysée et la matrice considérée :

- Pour les eaux usées : Les LQ sont de 100 ng/L en accréditation COFRAC et varient de 10 à 50 ng/L hors accréditation.
- Pour les boues : Les LQ varient entre 0,03 et 10 µg/kg MS selon la molécule analysée.

Quant à l'analyse AOF une LQ de 2 µg/L équivalent fluorures et pratiquée.

Il est important de s'assurer auprès du laboratoire d'analyse de la valeur de la LQ pratiquée par substance afin de s'assurer que ces dernières sont bien inférieures aux limites de significativité, lorsqu'elles sont définies.

6.3. Mode d'échantillonnage

- **Matrice Eau**

L'échantillonnage des rejets aqueux est à considérer en entrée et en sortie de station d'épuration afin de réaliser un état des lieux et d'évaluer le rendement épuratoire.

Avant de mettre en place une stratégie d'échantillonnage dans le cadre d'un suivi régulier, il est impératif d'établir un état des lieux des concentrations en PFAS sur les stations d'épuration du territoire et de réaliser une cartographie des sites présentant une concentration significative. La campagne d'état des lieux réalisée en France avant la définition des campagnes RSDE s'est déroulée sur 3 ans sur des sites pilotes en réalisant des analyses régulières sur un large panel de substances afin de déterminer les substances les plus pertinentes et de s'assurer de la faisabilité technique du suivi.

A la suite, un suivi régulier peut être mis en œuvre. Pour cela, plusieurs stratégies de fréquence d'échantillonnage sont possibles :

- **Selon la logique de la DERU** : réaliser au moins un prélèvement par mois sur les stations présentes sur la liste des sites cibles en fonction de la taille de la station (1 analyse par mois pour les stations de moins de 150 000 EH et 2 fois par semaine pour les stations de plus de 150 000 EH) [29],
- **Selon la logique RSDE utilisée en France** [114]: Pour les stations présentes sur la liste des sites cibles, prévoir six prélèvements par an à raison d'un prélèvement tous les deux mois par temps sec avec une campagne tous les 4 ans.
- **Selon une logique exploratoire** : Une campagne exploratoire supplémentaire (avant la mise en place du suivi à long terme) pourrait s'envisager sur les sites contaminés afin d'évaluer la variabilité temporelle. Cette campagne peut s'envisager sur 6 mois à raison d'un prélèvement par mois en entrée et en sortie des sites concernés. Les résultats obtenus de cette campagne pourraient révéler la nécessité d'un ajustement de la fréquence d'échantillonnage.

➤ **Matrice Boue**

La stratégie d'échantillonnage des boues suit la même logique que celle définie pour les eaux. Ainsi, avant de mettre en place une stratégie d'échantillonnage des boues dans le cadre d'un suivi régulier, il est impératif d'établir un état des lieux des concentrations en PFAS sur les stations d'épuration du territoire et de réaliser une cartographie des sites présentant une concentration significative.

Ensuite, un suivi exploratoire évaluant la variabilité temporelle des concentrations en PFAS dans les boues des sites contaminés peut être mis en place. Ce suivi peut s'envisager sur 6 mois à raison d'un prélèvement chaque 2 mois.

Si les résultats révèlent une variabilité négligeable, alors l'échantillonnage des boues pourrait s'envisager de la manière suivante :

- À pas de temps régulier comme au Michigan avec un prélèvement par trimestre pour les boues destinées à la valorisation agricole [71],
- Pour chaque lot de boues destinées à la valorisation avant épandage comme cela est déjà fait pour le suivi des éléments traces métalliques et de plusieurs polluants organiques [39].

Si la variabilité est importante, une fréquence d'échantillonnage calée sur le même schéma de prélèvement des eaux usées pourrait s'envisager. Avec un prélèvement de boues en amont et en aval de la filière de traitement afin d'estimer l'impact du traitement sur l'élimination des PFAS. Si cette variabilité persiste, des prélèvements à chaque étape de la filière de traitement en fonction de sa complexité et des moyens techniques et financiers pourraient également s'envisager.

6.4. Méthodes d'échantillonnage

Lors de chaque campagne, l'échantillon d'eau prélevé doit être représentatif du fonctionnement de l'ouvrage, et dans la mesure du possible, proportionnel au débit de l'effluent sur 24 heures et sur 7 jours consécutifs. Dans le cas où il est impossible d'effectuer un prélèvement proportionnel au débit de l'effluent, prélever alors un échantillon asservi au temps. Dans le cas où les deux premières options ne sont pas réalisables, procéder alors à un prélèvement ponctuel.

Avant de réaliser les prélèvements, s'assurer que les outils d'échantillonnages répondent aux recommandations techniques en termes des matériaux qui les composent. Ainsi il faut s'assurer que les outils d'échantillonnages soient exempts de Teflon ou de PTFE (Tableau 34, section 5.1.1).

Il est important à cette étape que les opérateurs qui réalisent les prélèvements soient formés et sensibilisés à la problématique du prélèvement des PFAS. Ainsi, les points de vigilances suivants devront être abordés avec eux :

- L'importance de la vigilance à porter quant aux matériaux recommandés et à éviter dans le cadre de la réalisation de l'échantillonnage (Tableau 34, section 5.1.1).
- La priorisation du port de vêtements en coton lors de la réalisation de l'échantillonnage (et éviter le port de vêtements contenant du téflon),
- L'application des protections anti-moustiques ou antisolaire avant l'arrivée sur le lieu de prélèvement, et le lavage des mains à l'eau et au savon juste après leur application,
- Le port obligatoire de gants en nitrile.
- L'importance du respect des conditions de stockage des échantillons.
- L'importance du respect du protocole de prélèvement afin de minimiser les erreurs analytiques.

Le suivi des PFAS dans la matrice eau est mieux documenté que leur analyse dans les matrices solides (boues et sols) [4]. En effet, leur identification et quantification précises dans les matrices solides et plus spécialement dans les boues sont rendues difficiles car elles sont liées aux substances extracellulaires des boues [96].

Afin que l'analyse soit la plus précise et la plus juste possible, plusieurs procédures sont essentielles et cela tout au long du processus analytique qui comprend les étapes suivantes :

- Le prélèvement de l'échantillon,
- La conservation de l'échantillon,
- La préparation de l'échantillon,
- L'analyse instrumentale.

6.5. Définition des seuils de significativité

La significativité des résultats obtenus est souvent centrale dans l'interprétation d'une campagne de surveillance. Le cas des PFAS, ne fait pas exception et présente des défis spécifiques :

- Les PFAS sont toxiques à très faible doses, souvent à des concentrations proches de leur limite de quantification dans les eaux usées et les boues,
- La famille des PFAS est très large et tous ne sont pas encore analysables en laboratoire par manque de standards analytiques,
- L'analyse des PFAS peut également dépendre de la matrice dans laquelle ils sont présents, par exemple certains PFAS sont analysables dans la matrice eau mais pas (encore) dans la matrice boue car parfois les méthodes d'extraction ne sont pas au point.
- Souvent plusieurs types de PFAS sont détectés dans un même échantillon. Ces derniers n'ont pas tous le même potentiel de toxicité. Par conséquent il est souvent nécessaire d'effectuer des sommes de PFAS en les pondérant avec des facteurs de risque,
- Les PFAS ont une période de demi-vie d'une dizaine d'années dans l'environnement. A titre d'exemple le TFA présente un temps de demi-vie dans l'eau de 30 ans, alors que le PFBS a un temps de demi-vie dans l'eau de 10 ans,
- Les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR), souvent utilisées pour définir les valeurs guides, sont encore en phase de définition.

Ces particularités ont conduit les autorités sanitaires à mettre en place plusieurs types de réponse en attendant d'avoir toutes les informations pour une décision éclairée :

- Demander aux exploitants de station d'épuration de mettre en place des systèmes de traitement permettant le meilleur abattement possible des PFAS dans les eaux usées sans pour autant préciser la liste des substances ou les valeurs guides (Danemark, Allemagne, Autriche, Canada)
- Définir des seuils de significativité pour les PFAS les plus fréquents (PFOS, PFOA, PFHxA) permettant de déclencher des actions de réduction de leurs concentrations (par exemple la recherche des sources).
- Définir des valeurs guides provisoires pour les substances les plus rencontrées dans les boues afin d'avoir des valeurs maximales à ne pas dépasser dans les sols ou des seuils d'alerte dans les boues (Allemagne, Autriche, Norvège, Australie, Michigan, Queensland). Ces seuils sont détaillés dans le paragraphe « Boues » ci-après.

➤ **Eaux usées**

A l'heure actuelle aucune valeur guide n'a été identifiée pour les rejets aqueux des stations d'épuration. Les limites identifiées concernent les rejets maximums autorisés dans les rejets d'effluents industriels. Par exemple, la France limite à 25 µg/L le PFOS dans les rejets des ICPE

et la Rhénanie du Nord Westphalie limite à 0,3 µg/L la somme du PFOS et du PFOA et fixe une limite de 1 µg/L pour la somme des PFAS dans tout type de rejet rejoignant le milieu naturel.

A noter qu'en France et en Allemagne des critères de significativité des rejets sont établis sur la base de valeurs dérivées de la directive DCE-NQE. Il est important de noter que les seuils de significativité définis dans ce cadre ne correspondent pas à un risque avéré mais à un seuil d'alerte obligeant au déclenchement d'actions de limitation du risque.

En Allemagne, il est recommandé de définir les valeurs de rejet autorisées dans les permis en fonction du débit d'étiage moyen d'une masse d'eau en utilisant l'équation suivante pour déterminer mathématiquement une charge polluante (C_{PL}) provoquée par un rejet ponctuel et dans le but de ne pas dépasser les NQE actuellement définies pour le PFOS [55]:

Équation 1 : charge polluante (CPL) provoquée par un rejet ponctuel en Allemagne

$$C_{PL} = \frac{MNQ \times C_{BG} + A_{WW} \times C_{WW}}{MNQ + A_{WW}}$$

where:

C_{PL} = pollution load

MNQ = Mean low water discharge upstream of the point of discharge (volume/time)

C_{BG} = Background concentration (mass/volume)

A_{WW} = Waste water discharge (volume/time)

C_{WW} = Substance concentration in waste water (mass/volume)

En France, dans le cadre de la campagne RSDE [114], les concentrations moyennes journalières mesurées des micropolluants (dont le PFOS) permettent, à l'aide des mesures de débit réalisées en entrée et en sortie de station d'épuration, de calculer, pour les eaux usées brutes et traitées, et pour chaque micropolluant, la moyenne pondérée des concentrations (CMP), le flux moyen journalier (FMJ) et le flux moyen annuel (FMA).

Les substances pour lesquelles au moins une concentration mesurée est supérieure à la limite de quantification, sont considérées comme significatives si elles présentent à l'issue de la campagne l'une des caractéristiques suivantes :

- Eaux brutes en entrée de STEU :
 - La moyenne pondérée des concentrations mesurées pour le micropolluant est supérieure à 50xNQE-MA soit 32,5 ng/L pour le PFOS ;
 - La concentration maximale mesurée est supérieure à 5xNQE-CMA soit 180 µg/l pour le PFOS ;
 - Les flux annuels estimés sont supérieurs aux seuils de déclaration dans l'eau²⁵;
- Eaux traitées en sortie de STEU :

²⁵ Actuellement seul le PFOS dispose d'un seuil qui est fixé à 0. C'est dire que dès que la substance est quantifiée, l'analyse est considérée comme significative.

- La moyenne pondérée des concentrations mesurées pour le micropolluant est supérieure à 10xNQE-MA soit 6,50 ng/L pour le PFOS ;
- La concentration maximale mesurée est supérieure à NQE-CMA soit 36 µg/l pour le PFOS ;
- Le flux moyen journalier pour le micropolluant est supérieur à 10 % du flux journalier théorique admissible par le milieu récepteur. Cette condition ne s'applique pas dans le cas particulier de rejets en eaux côtières ou en milieu marin ;
- Les flux annuels estimés sont supérieurs aux seuils de déclaration dans l'eau ;
- Le déclassement de la masse d'eau dans laquelle rejette la STEU, sur la base des états chimiques et écologiques de l'eau les plus récents (liste des paramètres déclassants transmise par le service de la police de l'eau)

Les règles de significativité du RSDE français sont à mettre en relation avec le projet de NQE révisée [35] moyenne annuelle pour les eaux de surface de 4,4 ng/L d'équivalent PFOA pour la somme de 24 PFAS sélectionnés à venir et donnerait donc les seuils suivants (si la règle ne change pas pour la prochaine campagne et que le projet de NQE révisée est validé) :

- Eaux brutes en entrée de STEU : 220 ng/L d'équivalent PFOA
- Eaux traitées en sortie de STEU : 44 ng/L d'équivalent PFOA

➤ **Boues**

Les boues sont la matrice de répartition préférentielle des PFAS avec une affinité qui se renforce avec l'augmentation de la longueur de la chaîne carbonée. La valorisation agricole des boues en tant que produit amendement et fertilisant pose également la question de leur innocuité pour la population, les écosystèmes et la préservation d'une qualité suffisante pour l'usage agricole des terres sur le long terme (en raison de la période de demi-vie des PFAS²⁶).

Le recensement des valeurs guides montre 2 types de seuil dans le suivi des boues :

- **Des seuils d'alerte** de 20 à 50 µg/kg MS pour le PFOS et de 50 µg/kg MS pour la somme du PFOS et du PFOA pour les valeurs définies avant 2020 et des seuils de l'ordre de 1-2 µg/kg par substance et de 10 µg/kg pour une somme des substances les plus courantes comme au Queensland. Ces seuils servent à déclencher des mesures de prévention ou de limitation du risque PFAS dans les boues et une obligation d'information de la présence de PFAS dans les boues auprès des utilisateurs.
- **Des seuils d'interdiction de la valorisation agricole des boues** souvent avec un facteur 2 sur le seuil d'alerte. On retrouve donc des valeurs comprises entre 40 et 125 µg/kg MS en limite pour le PFOS ou la somme du PFOS et du PFOA pour les pays ayant une politique favorisant la valorisation agricole (Canada,

²⁶ Les chiffres de demi-vie dans l'environnement varient en fonction des différents PFAS: l'acide trifluoroacétique (TFA) a une demi-vie de 10 000 jours (30 ans), les substances actives phytopharmaceutiques auraient une demi-vie moyenne de 26,5 jours dans le sol et 9,5 jours dans l'eau. Le PFBS a une demi-vie de 10 ans dans l'eau [6].

Autriche, Allemagne, Norvège, Suède). On retrouve des valeurs plus basses avec un panel de substance plus large dans les pays ayant défini des limites plus récemment comme au Danemark (10 µg/kg MS somme de 4 PFAS, 400 µg/kg MS somme de 22 PFAS) et en Australie (6,2 à 31 µg/kg MS pour le PFOS et le PFHxS et 25 à 130 µg/kg MS pour le PFOA).

Il est important de noter que les rapports officiels dans les pays ayant des seuils de l'ordre de 100 µg/kg MS pour le PFOS (parfois sommé avec le PFOA) jugent ces seuils trop hauts et vont probablement les abaisser lors de la prochaine révision (Etats Unis, Canada, Allemagne).

Une autre approche a également été développée dans certains pays anglo-saxons où le risque PFAS est intégré dans une logique d'analyse des risques et de maîtrise des points critiques similaires à l'HACCP (utilisé dans l'industrie agroalimentaire). Au Royaume Uni notamment le producteur de boues est responsable en cas de pollution et doit souscrire une assurance. Les valeurs guides sont dans ce cas définies entre le producteur de boues et son assureur.

6.6. Plan d'actions en cas de significativité

Dans le cadre d'une significativité avérée dans les eaux ou dans les boues, plusieurs actions peuvent être menées :

- Informations des parties prenantes du territoire (lancement d'alerte)
- Diagnostic amont avec recherche des sources et analyses complémentaires (substances complémentaires, AOF, milieu environnant, rejets industriels, recherche de PFAS dans les réactifs utilisés dans les traitements et dans les matériaux utilisés dans les ouvrages...)
- Mesures sur la valorisation agricole des boues (interdiction, réduction de la quantité épandable, informations obligatoires à destination de l'utilisateur),
- Mesures sur les terres agricoles où les boues de la station ont été épandues.

➤ Dans les eaux

Afin de réduire l'émission des micropolluants, un diagnostic vers l'amont des STEU présentant au moins une valeur significative peut être mis en place dans l'année qui suit la fin de la première campagne, selon la logique des campagnes RSDE en France. Ce diagnostic a vocation :

- A identifier les sources potentielles d'émission des PFAS identifiées,
- A proposer des actions de prévention ou de réduction à mettre en œuvre pour réduire la pollution à la source.

La mise en place d'un diagnostic à l'amont peut utilement suivre les grandes lignes suivantes [114] :

- Réalisation d'une cartographie du réseau de la STEU incluant les différents types de réseau (unitaire/séparatif/mixte), puis identification et délimitation géographique :
 1. Des bassins versants de collecte ;

2. Des grandes zones d'occupation des sols (zones agricoles, zones d'activités industrielles, zones d'activités artisanales, zones d'habitations, zones d'habitations avec activités artisanales) ;

- Identification sur la cartographie réalisée des contributeurs potentiels dans chaque zone ;
- Identification des émissions potentielles des PFAS par type de contributeurs et par bassin versant de collecte, sous couvert de disponibilité de ces informations ;
- Réalisation éventuelle d'analyses complémentaires pour affiner l'analyse des contributions par PFAS et par contributeur ;
- Réalisation complémentaire d'analyse AOF afin d'évaluer la présence de PFAS adsorbables non mesurables individuellement,
- Proposition d'actions visant la réduction des émissions de PFAS, associés à un calendrier de mise en œuvre et à des indicateurs de réalisation (vigilance quant aux produits de substitution)
- Identification des PFAS pour lesquelles aucune action n'est réalisable compte tenu de l'origine de leurs émissions ou l'impossibilité de leurs mesures de manière détaillée.

➤ **Dans les boues**

En cas de significativité avérée dans les boues, des mesures sur la valorisation des boues peuvent utilement être mise en œuvre. Ainsi les actions suivantes peuvent s'envisager :

- Informer obligatoirement l'utilisateur (permet à l'utilisateur de refuser le lot),
- Réduire la quantité de boues épandables (lorsque cela est possible),
- Interdire l'épandage des boues,
- Réaliser des analyses sur les terres agricoles où des boues contaminées ont été épandues,
- Concertation avec les autorités sanitaires pour l'évaluation des risques sur les récoltes.

7. Possibilités de traitement

Le développement de solutions de traitement et d'élimination des PFAS dans les différents compartiments de l'environnement (eau, sol, air) évolue très rapidement surtout avec l'évolution de la réglementation qui impose de plus en plus des limites de qualité basses et l'amélioration des techniques analytiques qui convergent de plus en plus vers des limites de détection très basses (de l'ordre du ng/L).

7.1. Traitement de l'eau

Plusieurs technologies ont été développées pour l'élimination des PFAS [116]. De manière générale ces techniques peuvent être considérées en deux grandes familles de traitement :

- Les techniques dites destructives comme le traitement thermique, l'électro oxydation catalytique et la sonolyse [92];
- Les techniques dites non destructives comme les traitements membranaires (ex. osmose inverse (OI), ultrafiltration (UF) nanofiltration (NF)), la flottation ou la technologie des microbulles (air, ozone), l'adsorption sur charbon actif en grain (CAG) ou sur de nouveaux adsorbants comme l'argile, la cellulose ou l'amidon modifié qui vont avoir une certaine affinité avec des PFAS à courte chaîne.

Le Tableau 39 récapitule les différentes technologies disponibles leurs spécificités techniques et leur domaine d'application :

Tableau 39: Récapitulatifs des techniques de traitement des PFAS dans l'eau [116].

Traitements destructifs	
L'électrolytation catalytique et la sonolyse	Ces techniques ne sont pas encore matures et leur développement est en cours.
Traitements non destructifs	
Les techniques membranaires (OI, UF, NF)	Cette technique est considérée comme une technologie éprouvée et est de plus en plus déployée pour le traitement des PFAS.
La flottation ou la technologie des microbulles (ozone ou air) appelée aussi foam/ozone fractionation	Cette technique est adaptée pour des effluents contenant de fortes concentrations en PFAS (de l'ordre de 2 à 5 µg/L) pour la somme des PFAS [91]
L'adsorption sur CAG	Cette technologie est éprouvée. Elle est largement utilisée à ce jour.
L'adsorption sur de nouveaux matériaux ou l'utilisation de nouveaux précipitants	Cette technologie n'est pas encore mature, elle se base sur l'utilisation d'adsorbants et précipitants à base d'argile, de cellulose ou d'amidon. Son développement vise le traitement des PFAS à courte chaîne.
Les résines échangeuses d'ions	Cette technologie fait partie des techniques éprouvées.

Les traitements présentés sont des traitements dont l'efficacité d'élimination des PFAS est avérée ou très prometteuse. Cependant il est important de souligner que les traitements classiques des eaux usées, telles que la coagulation suivie d'une séparation physique, l'aération, l'oxydation chimique, l'irradiation UV et la désinfection, sont insuffisants pour l'élimination des PFAS, ce qui entraîne leur présence dans les rejets [117].

Le choix et la mise en place d'un procédé de traitement doit être étudié selon l'objectif fixé pour l'élimination ou la destruction de PFAS. Ce choix sera réalisé selon le meilleur compromis technico économique en prenant en compte l'évolution et le durcissement de la réglementation. En effet, au fur et à mesure que les exigences réglementaires augmentent, le coût de l'élimination et de la destruction des PFAS peut être important. Ainsi afin de mieux gérer les incertitudes futures, il est important de prévoir une bonne planification modulable et adaptative.

Il existe plusieurs traitements possibles pour le traitement des PFAS dans l'eau, certains sont éprouvés et d'autres se révèlent très prometteurs. Ainsi, sont considérés matures les traitements suivants :

- L'adsorption sur CAG,
- Les traitements membranaires (Osmose Inverse, Ultra-Filtration, Nano Filtration),
- Les résines échangeuses d'ions,

Le choix d'une technique par rapport à une autre est à prendre selon le meilleur compromis technico économique et en prenant en compte l'évolution de la réglementation. Ainsi, il est important d'opter pour une planification modulable et adaptative [117].

7.2. Traitement des boues

Le traitement des boues contaminées aux PFAS est possible par incinération. Cette dernière, est considérée comme une technique mature. Elle nécessite des températures supérieures à 1100°C voir 1300°C afin de casser les liaisons très stables C-F [86]. Cependant, les produits issus de l'incinération peuvent susciter de nombreuses inquiétudes, comme aux Etats Unis où des poursuites contre les incinérateurs ont été menées dans certains états.

D'autres technologies sont en voie de développement [118]. Parmi elles nous pouvons citer la dégradation mécano-chimique [119] (mechanochemical degradation) qui est identifiée comme une technologie très prometteuse pour la destruction des PFAS contenus dans des matrices solides ou semi-solides et pouvant remplacer à long terme l'incinération.

La pyrolyse/gazéification peut être considérée comme une solution indirecte pour la valorisation des boues contenant de faibles concentrations en PFAS (inférieures aux seuils d'alerte) [120]. En effet, la pyrolyse et certaines formes de gazéification peuvent transformer des matières premières comme les boues en biochar tout en générant un gaz synthétique riche en hydrogène (syngaz). Ces deux produits peuvent être très précieux :

- Le biochar a de nombreuses applications potentielles et est actuellement utilisé comme amendement du sol qui augmente sa capacité à retenir l'eau et les nutriments, ce qui nécessite moins d'irrigation et d'engrais pour les cultures,
- Le gaz synthétique (syngaz), peut être utilisé sur site comme combustible supplémentaire pour le séchage des boues, ce qui réduit considérablement les besoins en énergie.

L'incinération des boues contenant des PFAS est actuellement considérée comme l'option de traitement la plus efficace. Néanmoins, les températures nécessaires sont très hautes et les produits issus de l'incinération incomplète de ces déchets, si le traitement des fumées est déficient, peuvent être toxiques suscitant ainsi de nombreuses inquiétudes liées à la sécurité sanitaire des populations.

D'autres techniques destructives sont en voie de développement visant des performances de traitement similaires à l'incinération, voire meilleures. A terme, ces nouvelles techniques pourraient offrir un meilleur compromis entre traitement, consommation énergétique et coût d'investissement.

7.3. Traitement des sols

La réhabilitation des sols comprend l'excavation et l'élimination ou l'incinération hors site, le lavage des sols, la stabilisation et les confinements. Ces traitements sont souvent assez coûteux, notamment lors des aménagements des sites, car l'élimination des terres excavées n'est pas facile du point de vue de la faisabilité économique.

Les figures 13 et 14 listent quelques traitements des lixiviats issus du lavage des sols [121] :

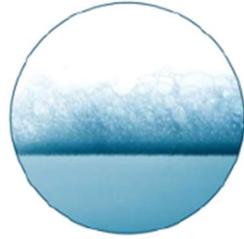
Exemples de technologies de traitement (ESO & Lixiviates)			
<p>ESO (Eaux souterraines) & Lixiviats des lavages des sols: Adsorption par des Polymères protéiniques & RemBind (Kaolinites, Acides Humiques), Coagulation chimique via $Al(OH)_x$ et résines d'échanges d'ions (in- & ex-situ): SENSATEC (Allemagne) & HPC INTERNATIONAL (France)</p>			
<p>➤ Adsorption sur Charbon Actif Liquide (in & ex-situ): Regnesis + Others</p>	<p>➤ Concentrations via air/water Interface Foam (ex-situ): ALLONIA</p>	<p>➤ Concentrations via Floculants bio-dégradables :ex-situ Cornelsen/TRS</p>	<p>➤ Argiles modifiés Adsorbés (ex-situ): CETCO & ETEC2</p>
<p>PLUME STOP Liquid Activated Carbon</p>  <p>Courtesy of Regenesis</p>	<p>SAFF® Foam Fractionation</p>  <p>Courtesy of Allennia</p>	<p>PerfluorAd®</p>  <p>Courtesy of Cornelsen/TRS</p>	<p>FLUROSORB®</p>  <p>Courtesy of CETCO</p>

Figure 13: Technologies des traitements des lixiviats issues du lavage des sols

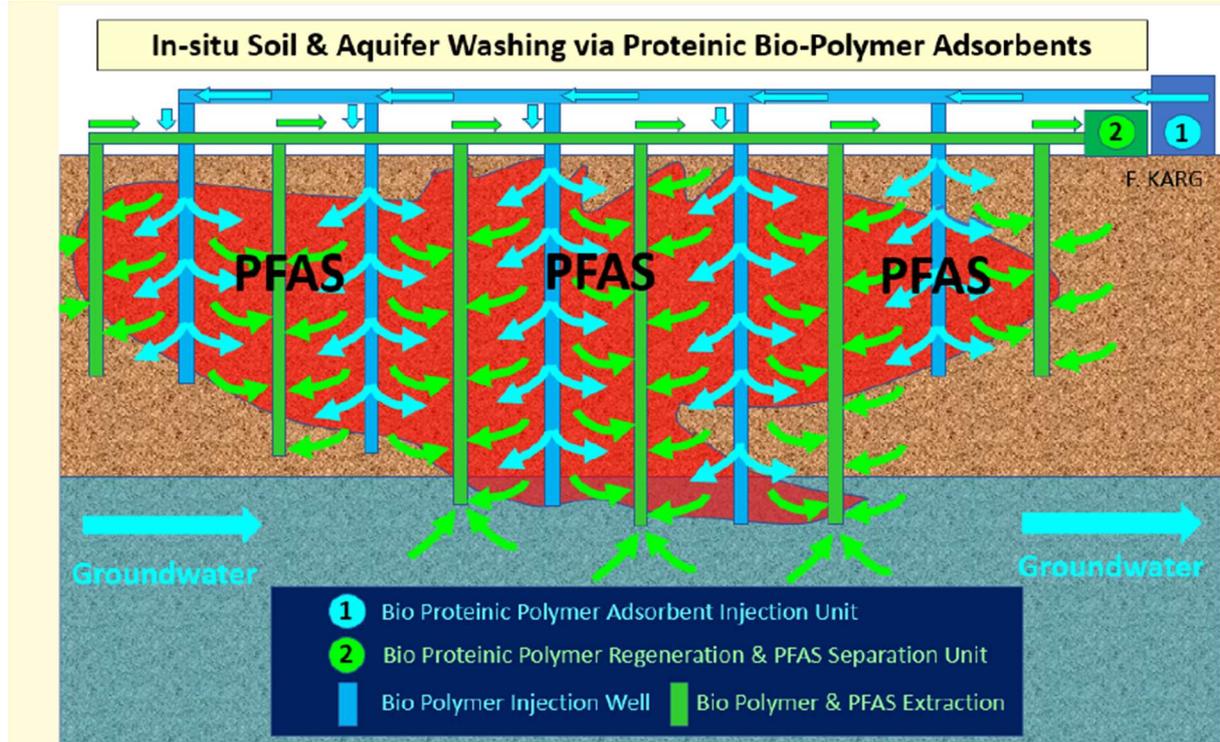


Figure 14 : Technologie de lavage in-situ des sols via des Biopolymères protéiniques en circuit avec une régénération des réactifs de lavage par séparation des PFAS

La notion de bioremédiation ou biorestauration des sols est souvent citée dans la littérature. Celle-ci est à prendre avec vigilance pour le cas des PFAS. En effet, la biodégradation des PFAS engendre davantage de PFAS à courte chaîne qui sont le plus souvent quantifiés et les plus mobiles [118].

8. Conclusions

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) sont des composés chimiques synthétiques utilisés depuis les années 1950 dans de nombreux produits industriels et de consommation pour leurs propriétés uniques de résistance à l'eau, aux taches, à la graisse et à la chaleur. La synthèse bibliographique réalisée dans cette étude souligne leur prévalence et leur persistance dans l'environnement. En raison de la robustesse de la liaison carbone-fluor, les PFAS sont extrêmement résistants à la dégradation naturelle, ce qui conduit à une accumulation progressive dans les sols, les eaux et les organismes vivants, y compris les humains. Cette caractéristique pose un problème écologique majeur, car les PFAS peuvent se déplacer à travers différents milieux (air, eau, sol), entraînant une contamination généralisée et durable.

En Belgique, la contamination de l'eau potable par les PFAS autour de la base militaire de Chièvres en Wallonie a été à l'origine d'un scandale politique en novembre 2023. Des scandales similaires ont vu le jour en Flandre et dans d'autres pays du monde en Europe, aux Etats Unis et en Australie, obligeant les autorités de ces pays à mettre en œuvre un renforcement progressif des restrictions d'usages de PFAS à travers l'adoption de stratégies nationales PFAS ou l'amélioration des connaissances scientifiques sur les propriétés, les sources ou les voies de transfert des PFAS. Ces actions ont permis d'identifier que les stations d'épuration sont l'une des principales voies de transfert des PFAS dans l'environnement, et de définir des valeurs maximales d'exposition pour l'homme et l'environnement.

Jusqu'en 2024, la Wallonie ne disposait pas de stratégie de surveillance et de lutte contre les PFAS issus des systèmes d'assainissement. Cette étude a donc permis de réaliser une synthèse bibliographique sur la thématique des PFAS présents dans les eaux et les boues de stations d'épuration afin d'initier un programme de surveillance basé sur les expériences et pratiques des autres pays et d'objectiver les résultats de la 1ère campagne de mesures réalisée début 2024 en Wallonie.

Les premières campagnes de suivi réalisées en Flandre et en Wallonie indiquent la présence d'une dizaine de PFAS, à des concentrations variables, dans les boues et les eaux en sortie de plusieurs stations d'épuration. Ces résultats confirment que la Wallonie connaît une situation comparable à ses voisins européens et implique la nécessité de se doter d'une réglementation/norme et d'un programme d'actions permettant la protection de la population et de l'environnement. Les résultats montrent également la pertinence de la 1ère campagne d'état des lieux sur les PFAS issus des systèmes d'assainissement mais soulèvent aussi des questions sur la grille d'analyse des résultats, sur les modalités de la pérennisation de cette surveillance et sur les actions de limitation du risque à entreprendre.

Cette étude bibliographique s'est donc attachée à apporter un éclairage sur ces différentes questions en réalisant une synthèse des réglementations et normes applicables dans les autres pays, puis en répertoriant les principales sources d'émissions et en étudiant les comportements des PFAS dans l'environnement et au sein de stations d'épuration. Afin d'avoir les éléments nécessaires à la mise en place d'un programme de suivi, cette étude bibliographique s'est également focalisée sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire des PFAS et a permis d'examiner les stratégies de surveillance applicables. Enfin

cette étude recense les voies de traitements possibles au sein des stations d'épuration pour les boues et les eaux usées.

Réglementations et normes

La réglementation des PFAS dans les eaux et les boues varie selon les pays avec une convergence vers des mesures de restriction, d'interdiction d'usage et d'abaissement des seuils réglementaires. A l'heure actuelle, il n'existe pas de limites de rejets de PFAS dans les eaux usées, ces dernières sont définies via les permis de rejets et les règles nationales sur les rejets d'effluents industriels. Ces valeurs sont généralement définies afin d'éviter les dépassements des valeurs seuils dans les eaux superficielles, continentales, les eaux souterraines et l'eau potable. En revanche, pour le suivi des boues, des seuils sont en vigueur dans plusieurs pays et deux types de seuils sont, actuellement, considéré dans le suivi des boues :

- Des seuils d'alerte obligeant le déclenchement d'actions de limitation du risque. Ils sont de l'ordre de 20 à 50 µg/kg MS pour le PFOS et ou le PFOA pour les seuils dits « anciens », et de l'ordre de 1 à 2 µg/kg MS par substance ou de 10 µg/kg MS pour des sommes de substances pour les seuils dits « récents »²⁷
- Des seuils d'interdiction de la valorisation agricole des boues. Ils sont de l'ordre de deux fois les valeurs de seuils d'alerte.

Principales sources d'émission

La diversité d'usage des PFAS implique qu'à l'échelle d'un territoire les sources d'émissions peuvent être diverses et variées et vont dépendre du bassin de population et des activités économiques historiques ou actuelles. En dehors des sites industriels producteurs ou consommateurs de PFAS, il est souvent complexe de déterminer la source d'une contamination. Cela est d'autant plus vrai pour les PFAS à chaîne courte car ils sont très mobiles et sont souvent issus de la dégradation d'autres PFAS à chaîne longue. Cependant, certains PFAS à chaîne longues, tels que les FTS utilisés dans les mousses anti-incendie AFFF ou les diPAP utilisés dans les cosmétiques sont plus spécifiques et peuvent être rattachés à certains usages surtout lorsqu'ils sont mesurés en combinaison avec d'autres PFAS. Les résultats de la 1ère campagne suggèrent notamment que plusieurs systèmes d'assainissement pourraient être contaminés par les mousses AFFF.

Comportements des PFAS

Les substances PFOS, PFOA et PFHxS sont les PFAS dont le comportement dans l'environnement est le mieux documenté en raison de leur présence et persistance dans les différents compartiments de l'environnement mais aussi en raison de leur toxicité et écotoxicité vis-à-vis du vivant. Les connaissances sur d'autres PFAS et notamment les « précurseurs » sont pour le moment insuffisantes. Plusieurs études sont en cours ayant pour but de mieux documenter ce volet.

²⁷ Les seuils récents désignent des valeurs définies après 2020 notamment avec les valeurs définies au Danemark

De manière globale, le comportement des PFAS dépend de la longueur de la chaîne carbonée et de l'acidité du milieu. En effet, plus la chaîne carbonée est courte plus la molécule est hydrophile et sera mobile dans son environnement. Par conséquent les PFAS à chaîne courte seront plutôt retrouvés dans les effluents en sortie de station et les PFAS à chaîne longue seront plutôt adsorbés sur les boues. Les PFAS étant des acides forts, leur capacité d'adsorption sur les boues sera inversement proportionnelle au pH.

La stabilité chimique des PFAS les rend également très résistants aux mécanismes de dégradation en station d'épuration. L'abattement de la présence de PFAS au sein de ces équipements est donc très faible. Au mieux, les PFAS à chaîne longue seront dégradés en PFAS à chaîne plus courte et plus stable via des mécanismes d'oxydation.

Méthode d'échantillonnage et technique d'analyse

Le suivi des PFAS dans la matrice eau est mieux documentée que leur analyse dans les matrices solides (boues et sols). Afin que l'analyse soit la plus précise et la plus juste possible, il est important de respecter la chaîne analytique et cela du prélèvement jusqu'à l'analyse en passant par la conservation et la préparation de l'échantillon. Une vigilance particulière doit être apportée aux types de matériaux qui composent les outils de prélèvement. Ces derniers doivent répondre aux exigences techniques nécessaires pour le prélèvement des PFAS.

Les prélèvements des échantillons d'eau et de boues doivent être représentatifs du fonctionnement de l'ouvrage :

- Pour le prélèvement d'eau : il semblerait que des échantillons proportionnels au débit sur 24 heures pendant plusieurs jours consécutifs soient le plus approprié en termes de représentativité de l'échantillon. Ces prélèvements sont à réaliser en entrée et en sortie de station d'épuration,
- Pour le prélèvement des boues : il est conseillé de réaliser des prélèvements d'échantillons moyennés spatialement sur la même période de prélèvement que les eaux. Ces prélèvements sont à réaliser sur les lots de boues destinés à la valorisation agricole.

La sélection des sites à surveiller est souvent réalisée en fonction de la taille des stations d'épuration. La fréquence d'échantillonnages des eaux peut être réalisée, selon une logique exploratoire à raison d'un prélèvement par mois afin d'évaluer la variabilité temporelle de la présence de PFAS sur les sites concernés (après établissement d'un état des lieux des concentrations en présence). Elle peut également être établie selon la réglementation en vigueur pour la surveillance de micropolluants par exemple :

- Selon la logique de la DERU : Un prélèvement par mois pour les stations de moins de 150 000 EH et 2 fois par semaine pour les stations de plus de 150 000 EH
- Selon la logique RSDE utilisée en France : Six prélèvements par an à raison d'un prélèvement tous les deux mois par temps sec avec une campagne tous les 4 ans pour les stations supérieures à 10 000 EH.

L'échantillonnage des boues suit la même logique que pour les eaux. Après réalisation de l'état des lieux de la présence de PFAS, un suivi exploratoire sur 6 mois à raison d'un prélèvement

chaque deux mois, serait pertinent. Si les résultats obtenus présentent une variabilité négligeable alors un prélèvement par lot destiné à la valorisation agricole ou un prélèvement par trimestre peuvent être envisagés.

Les molécules à suivre doivent être sélectionnées selon leur pertinence, les exigences réglementaires et la faisabilité analytique. L'étude a relevé 33 molécules qui pourraient être reprises dans le suivi : en plus des 28 PFAS déjà identifiés, le PFOSA, le 6:2 FTS, le 8:2 FTS, le 8:2 diPAP et le TFA.

Plusieurs techniques analytiques peuvent être employées pour l'analyse des PFAS. Celles-ci peuvent être quantitatives ou semi quantitatives. La chromatographie liquide ou gaz couplés à la spectrométrie de masse (LC/MS/MS et GC/MS/MS) est la plus utilisée dans le cadre d'une surveillance de PFAS dans les stations d'épuration. Cette méthode quantitative offre des limites de quantification de l'ordre d'une dizaine de ng/L par molécule analysée dans les rejets aqueux et d'une centaine ng/kg/MS dans les boues.

Stratégie de surveillance

La mise en place d'une campagne de surveillance dans des stations de traitement d'eaux usées dépend des objectifs de l'étude et des moyens matériels et humains qui peuvent être mis en œuvre. Au vu de la littérature, de la réglementation en vigueur et de la faisabilité analytique, les étapes suivantes se basant sur les critères cités précédemment ont été déterminées pour la mise œuvre à long terme d'une campagne de surveillance des PFAS dans les eaux et les boues des stations d'épuration :

1. Définition des sites cibles selon les pratiques des pays de l'Union Européenne selon la taille des stations d'épuration en établissant, par exemple :
 - Une liste principale qui comprend toutes les stations d'une taille supérieure à 10 000 EH ou 50 000 selon l'ambition et les moyens du programme de suivi,
 - Une liste complémentaire de stations qui répondent à au moins un des critères suivants :
 - Présence "significative" de PFAS en entrée/sortie mesurée lors de la campagne d'état des lieux de 2024 (en cours de réalisation).
 - Présence "significative" de PFAS dans un lot de boues destinées à la valorisation agricole,
 - Présence sur le bassin de la station d'un hotspot,
 - Présence sur le bassin de la station d'un site prioritaire,
 - Présence sur le bassin d'un site avec un permis de rejet citant les PFAS,
 - Ajout à la demande d'une autorité de santé,
2. Définition des molécules à suivre selon la pertinence et la faisabilité analytique en s'assurant que la valeur de la limite de quantification (LQ) pratiquée par substance soit inférieure aux limites de significativité,
3. Définition des modes et méthodes d'échantillonnage pour les matrices eau et boue selon les résultats analytiques de l'état des lieux et la réglementation, tout en s'assurant de la

représentativité de l'échantillon et en garantissant la sensibilisation des opérateurs aux enjeux de l'échantillonnage des PFAS,

4. Définition des seuils de significativité pour les eaux et les boues qui pourraient s'inspirer des méthodes de calculs adoptées dans le RSDE français pour les eaux et des seuils en vigueur dans plusieurs pays pour les boues,
5. Mise en place d'un plan d'actions en cas de significativité qui pourrait s'inspirer du RSDE français, il peut inclure les actions suivantes :
 - Informations des parties prenantes du territoire (lancement d'alerte)
 - Diagnostic amont avec recherche des sources et analyse complémentaires (substances complémentaires, AOF, milieu environnant, rejets industriels...)
 - Mesures sur la valorisation agricole des boues (interdiction, réduction de la quantité épandable, informations obligatoires à destination de l'utilisateur)
 - Mesures sur les terres agricoles où les boues de la station ont été épandues

Traitement des PFAS au sein des systèmes d'assainissement

Plusieurs traitements sont possibles pour l'élimination des PFAS. Certains sont éprouvés et d'autres se révèlent très prometteurs. Pour le traitement des rejets aqueux, sont considérés matures : l'adsorption sur CAG, les traitements membranaires (Osmose Inverse, Ultra Filtration, Nano Filtration) et les résines échangeuses d'ions. Quant au traitement des boues, le traitement thermique est considéré comme le traitement le plus efficace à l'heure actuelle.

Le choix d'une technique par rapport à une autre est à prendre selon le meilleur compromis technico économique et en prenant en compte l'évolution de la réglementation. Ainsi, il est important d'opter pour une planification modulable et adaptative.

L'état de l'art réalisé a permis de répondre aux objectifs de l'étude en couvrant la totalité des lignes définies. Il retranscrit des informations récentes relatives à la présence des PFAS dans les stations d'épuration. Ces informations combinées à la faisabilité analytique ont permis d'aboutir à une proposition de mise en œuvre de campagne de surveillance des PFAS dans les eaux et les boues de stations d'épuration. Cette proposition a été réalisée selon une démarche modulable et adaptative en prenant en compte les résultats analytiques obtenus et l'évolution de la réglementation.

Au cours de cette investigation, plusieurs points de vigilance et /ou axes de réflexions ont été soulevés. Ces derniers sont répertoriés ci-dessous et pourraient utilement être mis en œuvre :

Veille réglementaire

- La réglementation sur les PFAS est en phase très dynamique et plusieurs pays (US, Canada, Australie, Allemagne) et les agences européennes ayant annoncé leur intention de réviser les règles applicables en 2024, il serait pertinent d'actualiser la veille réglementaire vers le 3ème trimestre de 2025 notamment afin d'identifier les nouveaux seuils utilisés.
- Prendre contact directement avec les administrations en charge de la révision de seuils afin d'obtenir les valeurs provisoires (si communicables)

Surveillance

- Poursuivre la campagne d'état des lieux (« Audit ») sur les stations d'épuration wallonnes afin d'avoir une cartographie claire des sites avec une présence de PFAS significative et en fonction des résultats obtenus :
 - Définir la liste des stations devant faire l'objet d'un suivi régulier et celles devant faire l'objet d'un suivi renforcé,
 - Définir la liste des substances pertinentes à suivre dans le cadre d'un suivi régulier (par exemple : 24 substances de la directive NQE + FTS) et dans le cadre d'un suivi renforcé (liste élargie à toutes les substances mesurables soit une cinquantaine de PFAS),
 - Définir les fréquences d'échantillonnage pour le suivi régulier et le suivi renforcé,
 - Définir seuils significatifs réglementaires en tenant compte des Limites de Quantification (LQ) atteignables par les laboratoires,
- Mettre en place un suivi régulier des PFAS en entrée/sortie des stations et sur les boues en fonction des résultats de la campagne d'état des lieux,
- Intégration des PFAS dans le suivi micropolluants de la DERU (la liste pourrait être restreinte aux principaux PFAS : PFOS, PFOA, PFHxA, PFNA et GenX),
- Evaluer les coûts des différents programmes de suivi de PFAS (régulier, renforcé) afin de confirmer leur faisabilité et, le cas échéant, les intégrer aux budgets de fonctionnement des systèmes d'assainissement.

Définir les seuils

- Seuil de significativité en fonction des concentrations trouvées en entrée/sortie des stations et dans les boues
- Seuil d'alerte en fonction des concentrations trouvées en entrée/sortie des stations et dans les boues
- Seuil d'interdiction de la valorisation agricole ou de restriction de l'usage des boues (quantité épandable, typologie de sol...)
- Définir des plans d'actions à conduire en fonction des seuils,
- Définir les quantités admissibles des sols agricoles et établir une carte des teneurs déjà existantes dans le sol,
- Évaluer la quantité de boues concernée par une éventuelle interdiction/limitation de valorisation agricole, la disponibilité des filières alternatives d'élimination et les coûts associés.

Réaliser un atlas des PFAS

- Croiser les résultats obtenus sur les stations d'épuration avec les résultats obtenus par les campagnes de surveillance sur les PFAS dans l'eau potable, les eaux superficielles, les eaux souterraines et les sols afin d'évaluer la concordance des contaminations à l'échelle d'un territoire et faciliter l'identification des sources.
- Identifier les sites prioritaires, les hotspots et les sources probables afin de limiter le plus en amont possible la diffusion des PFAS sur le territoire.

Eviter l'entrée des PFAS dans les systèmes d'assainissement

Lorsque les PFAS sont entrés dans le réseau d'assainissement, il est déjà quasiment trop tard pour agir et le coût du traitement des eaux usées peut être fortement impacté. Il est donc nécessaire d'agir en amont du réseau. Cela peut passer par les mesures suivantes :

- Révision des permis de rejet avec des seuils PFAS les plus bas possibles,
- Favoriser l'infiltration des eaux pluviales et déconnecter les eaux pluviales du réseau d'eaux usées pour éviter la contamination par ruissellement,
- Déconnexion du réseau des sites avec une contamination avérée,
- Limitation/interdiction des productions et/ou usages des PFAS, avec une vigilance par rapport aux produits de substitution,
- Sensibilisation des utilisateurs de PFAS et accompagnement pour la mise en place de solution de substitution.

Transparence et communication

- Mettre en place un dispositif d'alerte entre les parties prenantes d'un territoire en cas de mesure significative,
- Informer l'utilisateur de boues sur la teneur en PFAS mesurée dans le lot (et lui permettre de refuser le lot si un seuil d'alerte est dépassé),
- Mettre en place un Label pour les boues de "haute qualité" (ex : REVAQ en Suède),
- Transparence totale sur les résultats obtenus avec publication sur un site officiel

Veille sur les techniques de traitement et de prévention

- Mettre en place une veille technique sur les meilleures techniques disponibles afin de permettre un abattement des concentrations de PFAS dans l'eau et les boues,
- Identifier les techniques pouvant avoir un effet pénalisant sur les rendements épuratoires (ex : technique d'oxydation)
- Définir le protocole d'élimination des boues jugées impropres à la valorisation agricoles (notamment les températures d'incinération et les exigences sur le traitement des fumées),
- Estimation des coûts d'investissement et de fonctionnement pour le traitement des PFAS (et autres micropolluants) au sein des systèmes d'assainissement.

9. Bibliographie et webographie:

- [1] « Gestion des boues de stations d'épuration collectives », SPW, nov. 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/DECHETS%208.html#:~:text=Les%20boues%20produites%20sont%20presque,ont%20%C3%A9t%C3%A9%20in cin%C3%A9r%C3%A9s%20sans%20valorisation.>
- [2] « PFAS : des substances chimiques très persistantes », Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/pfas-substances-chimiques-persistantes>
- [3] B. Moose, « Per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater and soil: A review », University of Florida, avr. 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://soils.ifas.ufl.edu/media/soilsifasufledu/sws-main-site/pdf/technical-papers/Moose_Benjamin_Six_Month_Embargo_Period_Spring_2020.pdf
- [4] « Analyse des risques de présence de per- et polyfluoroalkyles (PFAS) dans l'environnement », IGEDD, avr. 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/analyse-des-risques-de-presence-de-per-et-a3658.html>
- [5] OECD, *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance*. in OECD Series on Risk Management of Chemicals. OECD, 2021. doi: 10.1787/e458e796-en.
- [6] Isaac-Sibille, « PFAS, Pollution et dépendance: comment faire marche arrière ? », janv. 2024. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-43441-rapport-cyrille-isaac-sibille-pfas-mission.pdf>
- [7] « About PFASs - OECD Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://search.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/aboutpfass/glossary.htm>
- [8] C. CHARLEMAGNE, « PFAS – état des lieux. Direction de l'Assainissement des Sols - Département du Sol et des Déchets », 15 juin 2023.
- [9] C. Simonnet-Laprade, « Ecodynamique des substances poly- et perfluoroalkylées (PFAS) dans les systèmes aquatiques : identification des sources en milieu urbain et évaluation du transfert trophique », These de doctorat, Bordeaux, 2017. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2017BORD0938>
- [10] Reporterre, « Le papier toilette contient des polluants éternels toxiques », Reporterre, le média de l'écologie - Indépendant et en accès libre. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://reporterre.net/Le-papier-toilette-contient-des-polluants-eternels-toxiques>
- [11] L.-S. Brinker, « Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen - Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf », Umweltbundesamt, juill. 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/trifluoracetat-tfa-grundlagen-fuer-eine-effektive>
- [12] « TFA dans l'eau en Europe Révélations exclusives sur une contamination aux PFAS ignorée », PAN Europe - Générations futures, mai 2024. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.generations-futures.fr/wp-content/uploads/2024/05/tfa-mai-2024-vf.pdf>
- [13] « PFAS, ce qu'il faut savoir », ARS Auvergne Rhône Alpes. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.auvergne-rhone-alpes.ars.sante.fr/pfas-ce-quil-faut-savoir>
- [14] « Emerging chemical risks in Europe — 'PFAS' », European Environment Agency. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur:

- <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-chemical-risks-in-europe/emerging-chemical-risks-in-europe>
- [15] « The Forever Pollution Project – Journalists tracking PFAS across Europe ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://foreverpollution.eu/>
- [16] « PFAS in Flanders », Flanders.be. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vlaanderen.be/en/pfas-in-flanders>
- [17] « Geopunt | Digitaal Vlaanderen ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.geopunt.be/?service=https%3A%2F%2Fwww.dov.vlaanderen.be%2Fgeoserv%2Fpfas%2Fwms%3Flayers%3Dno_regret_huidig
- [18] K. Vrancken, « Personal summary of the first interim report on the PFAS contamination », Gouvernement of Flanders. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/46454>
- [19] L. Six, « Monitoring PFAS in soil and groundwater », 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1708681447/OVAM_Laetitia_Six_etn9wc.pdf
- [20] *Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants (POP)*. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://chm.pops.int/Portals/0/sc10/files/a/stockholm_convention_text_f.pdf
- [21] « Substances perfluoroalkylées (PFAS) - ECHA ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/fr/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>
- [22] « Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) -WHO », WHO. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/chemical-hazards-in-drinking-water/per-and-polyfluoroalkyl-substances>
- [23] *CONVENTION DE BÂLE SUR LE CONTRÔLE DES MOUVEMENTS TRANSFRONTIÈRES DE DÉCHETS DANGEREUX ET DE LEUR ÉLIMINATION*. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx>
- [24] *Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international*. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pic.int/LaConvention/Aper%C3%A7u/TextedelaConvention/tabid/1786/language/fr-CH/Default.aspx>
- [25] « Liste des substances soumises au règlement POP - ECHA ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/fr/list-of-substances-subject-to-pops-regulation>
- [26] *Règlement (UE) 2019/1021 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants (refonte) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.)*, vol. 169. 2019. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1021/oj/fra>
- [27] *Règlement (CE) n o 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n o 793/93 du Conseil et le règlement (CE) n o 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission*, vol. 396. 2006. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1907/oj/fra>
- [28] « Judgement of the General Court (Eighth Chamber) – 23 February 2022 ». Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?text=&docid=254484&pageIndex=0&doclang=EN&mode=lst&dir=&occ=first&part=1&cid=202865>

- [29] « Règlement (UE) 2024/573 du Parlement européen et du Conseil du 7 février 2024 relatif aux gaz à effet de serre fluorés, modifiant la directive (UE) 2019/1937 et abrogeant le règlement (UE) no 517/2014 ».
- [30] « TFA as an atmospheric breakdown product », Fluorocarbons. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fluorocarbons.org/environment/environmental-impact/tfa-as-an-atmospheric-breakdown-product/>
- [31] *Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*, vol. 309. 2009. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/128/oj/fra>
- [32] « Acide trifluoroacétique (TFA) dans les eaux, l'eau potable et les eaux usées ».
- [33] *Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (refonte) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*, vol. 435. 2020. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/fra>
- [34] *Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil, du 20 décembre 1994, relative aux emballages et aux déchets d'emballages*, vol. 365. 1994. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/dir/1994/62/oj/fra>
- [35] « Normes de qualité environnementale applicables aux eaux de surface | EUR-Lex ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/environmental-quality-standards-applicable-to-surface-water.html>
- [36] *Amending Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy, Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration and Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy*. Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-44293-proposition-directive-commission-europeenne-modification-surveillance-eaux.pdf>
- [37] *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy, Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration and Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy*. Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-44293-position-conseil-europeen-propositions-modifications-surveillance-eaux.pdf>
- [38] *DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (refonte)*. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc078ec8-55f7-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF
- [39] *Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture*, vol. 181. 1986. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/oj/fra>
- [40] « DOCUMENT DE TRAVAIL DES SERVICES DE LA COMMISSION RÉSUMÉ DE L'ÉVALUATION Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture », Commission Européenne, mai 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023SC0158>
- [41] *Règlement (UE) 2019/1010 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 sur l'alignement des obligations en matière de communication d'informations dans le domaine de la législation liée à l'environnement et modifiant les règlements (CE) no 166/2006 et (UE) no 995/2010 du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/49/CE, 2004/35/CE, 2007/2/CE, 2009/147/CE et 2010/63/UE du Parlement européen et du Conseil, les*

- règlements (CE) no 338/97 et (CE) no 2173/2005 du Conseil et la directive 86/278/CEE du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*, vol. 170. 2019. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1010/oj/fra>
- [42] « PFAS dans les eaux et les sols en Région de Bruxelles-Capitale ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/pfas-dans-les-eaux-et-les-sols-en-region-de-bruxelles-capitale>
- [43] « CODE DE BONNES PRATIQUES POUR L'ÉTUDE ET LE TRAITEMENT DES PFAS DANS LE SOL ET L'EAU SOUTERRAINE », Bruxelles Environnement, juin 2024. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://alfresco.environnement.brussels/share/s/HsDXkceORUune7vdONUcgA>
- [44] « PFAS-normenkader », Vlaanderen.be. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vlaanderen.be/pfas-vervuiling/pfas-normenkader>
- [45] « Bijlage 4.2.5.2. Controle en beoordeling van de meetresultaten op lozingen van bedrijfsafvalwater en koelwater », VITO, janv. 2024. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://navigator.emis.vito.be/detail?woId=10089&woLang=nl&woVersion=2024-01-16>
- [46] autorite flamande, « Arrêté Du Gouvernement Flamand du 07/07/2023 arrete du gouvernement flamand etablissant un cadre d'action temporaire pour l'utilisation de materiaux de sol contenant des pfas et pour la concretisation du critere d'assainissement, vise a l'article 19, § 1er, du decret relatif au sol du 27 octobre 2006, pour des sols contenant des pfas », etaamb.openjustice.be. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://etaamb.openjustice.be/fr/arrete-du-gouvernement-flamand-du-07-juillet-2023_n2023044423.html
- [47] « COMPENDIUM VOOR MONSTERNEMING EN ANALYSES VAN AFVALSTOFFEN EN BODEM (CMA) », VITO. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://emis.vito.be/nl/erkende-laboratoria/bodem-en-afvalstoffen-ovam/compendium-cma/gearchiverde-versies-cma>
- [48] « Compendium voor de monsterneming, meting en analyse van water (WAC) | EMIS ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://emis.vito.be/nl/erkende-laboratoria/water-gop/compendium-wac>
- [49] « Per- en polyfluoralkylverbindingen (PFAS) in bodem en sediment », 2024.
- [50] « Bepaling van per- en polyfluoralkylverbindingen (PFAS) in water met LC-MS/MS », 2024.
- [51] « Bepaling van ultrakorte keten per- en polyfluoralkylverbindingen (PFAS) in water met LC-MS/MS », 2024.
- [52] « Risques émergents - PFAS ». [En ligne]. Disponible sur: <http://environnement.sante.wallonie.be/pfas>
- [53] « Lignes directrices pour les PFAS pour les études décret sols », DAS Wallonie, déc. 2023. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sol.environnement.wallonie.be/files/Document/CWBP/PNN/PNN%20Version%207/annexe%2011.pdf>
- [54] « Liste non exhaustive des activités qui présentent un risque de rejet de PFAS ». OVAM. Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sol.environnement.wallonie.be/files/Expert/PFA%20TABLEAU.pdf>
- [55] « Guidelines for PFAS assessment in Germany ».
- [56] « Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen - PFAS ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/stoffradar/pfas>
- [57] « Sludge and the circular economy - the impact of PFAS », EurEau, juill. 2022. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/6718-briefing-note-on-sludge-and-the-circular-economy-the-impact-of-pfas/file>
- [58] « Proposition de loi n°2710 ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/textes/l16b2710_proposition-loi

- [59] « Plan d'actions interministériel sur les PFAS - France », Gouvernement Français, avr. 2024. Consulté le: 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2024.04.05_Plan_PFAS.pdf
- [60] « Arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation - Légifrance ». Consulté le: 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047739535>
- [61] « pfas-report-in-english_2022a.pdf ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.svensktvatten.se/globalassets/om-oss/in-english/pfas-report-in-english_2022a.pdf
- [62] « pfas_flyer_220822_en.pdf ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://cdnmedia.eurofins.com/european-east/media/2862520/pfas_flyer_220822_en.pdf
- [63] *Ordonnance du DETEC concernant la modification de l'annexe 2, ch. 11, al. 3, de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)*. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/60235.pdf>
- [64] « Information-Letter-PFAS-Monitoring.pdf ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cdn.dwi.gov.uk/wp-content/uploads/2021/10/04203217/Information-Letter-PFAS-Monitoring.pdf>
- [65] « Cleaning up UK drinking water | PFAS », Royal Society of Chemistry. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rsc.org/policy-evidence-campaigns/environmental-sustainability/sustainability-reports-surveys-and-campaigns/cleaning-up-uk-drinking-water/>
- [66] « CIP3 Information », <https://UKWIR.org>. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://UKWIR.org/cip3-information>
- [67] « Analysis of the most appropriate regulatory management options ».
- [68] O. US EPA, « Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
- [69] « pfas-ncpdwr_fact-sheet_general_4.9.24v1.pdf ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/pfas-ncpdwr_fact-sheet_general_4.9.24v1.pdf
- [70] T. Whitehouse, « Notice of Intent to File Suit Regarding Alleged Violation of the Clean Water Act (CWA) ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-03/noi-2_22_24-pfas-biosolids.pdf
- [71] S. G. Hughes, « PFAS in Biosolids: A Review of State Efforts & Opportunities for Action », ECOS. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecos.org/wp-content/uploads/2023/01/PFAS-in-Biosolids-A-Review-of-State-Efforts-and-Opportunities-for-Action.pdf>
- [72] « Interim Soil and Water Environmental Action Levels (EALs) for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) », State of Hawaii, 12/042024. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://health.hawaii.gov/heer/files/2024/04/PFAS-Update-signed-April-2024.pdf>
- [73] « Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Hawaii », HEER Office. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://health.hawaii.gov/heer/environmental-health/highlighted-projects/pfas/>
- [74] « Environmental Hazard Evaluation and Environmental Action Levels », HEER Office. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://health.hawaii.gov/heer/guidance/ehe-and-eals/>
- [75] H. Canada, « Water talk: PFOS, PFOA and other PFAS in drinking water ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.canada.ca/en/services/health/publications/healthy-living/water-talk-drinking-water-screening-values-perfluoroalkylated-substances.html>
- [76] « Draft PFAS National Environmental Management Plan: Version 3.0 », HEPA. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://storage.googleapis.com/files-au-climate/climate->

- au/p/prj2724c33a272eb32138447/public_assets/CONSULTATION%20DRAFT%20PFAS%20NEMP%203.0.pdf
- [77] M. Soejima, « PFAS policy in Japan », https://www.jsdfe.org/topics/2-3_PFAS%20policy%20Japan-221019.pdf. [En ligne]. Disponible sur: https://www.jsdfe.org/topics/2-3_PFAS%20policy%20Japan-221019.pdf
- [78] « Summary of the Guideline on the Treatment of Wastes Containing Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS), and Its Salts in Japan », Ministry of the Environment of Japan, avr. 2013. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.env.go.jp/en/focus/docs/files/201304-89.pdf>
- [79] « Water Pollution Prevention Act - English - Japanese Law Translation ». Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/2815/en>
- [80] « Japan PFAS Situation Report », Japan Endocrine Disruption Prevention Action, avr. 2019. Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://ipen.org/sites/default/files/documents/japan_pfas_country_situation_report_apr_2019.pdf
- [81] « National Implementation Plan for the Stockholm Convention - South Korea », Republic of Korea, 2019. [En ligne]. Disponible sur: [file:///D:/Users/ndhuy/Downloads/UNEP-POPS-NIP-KoreaRep-COP7.English%20\(1\).pdf](file:///D:/Users/ndhuy/Downloads/UNEP-POPS-NIP-KoreaRep-COP7.English%20(1).pdf)
- [82] « Check Your Tech - A guide to PFAS in electronics | Substitution des composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS) et des substances persistantes, mobiles et toxiques (PMT) ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://substitution-perfluores.ineris.fr/fr/document/check-your-tech-guide-pfas-electronics>
- [83] « RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) ». ECHA, 2023. Consulté le: 18 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/documents/10162/1c480180-ece9-1bdd-1eb8-0f3f8e7c0c49>
- [84] « PFAS : la surveillance des rejets industriels dans l'eau et des milieux aquatiques ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.auvergne-rhone-alpes.ars.sante.fr/pfas-la-surveillance-des-rejets-industriels-dans-leau-et-des-milieux-aquatiques>
- [85] « Comportement des substances per et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les sols et les eaux souterraines | Ineris ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/fr/comportement-substances-polyfluoroalkylees-pfas-sols-eaux-souterraines>
- [86] « Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS | Ineris ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/fr/etude-bibliographique-thermodegradation-pfas>
- [87] H. Campos-Pereira *et al.*, « Binding of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) by organic soil materials with different structural composition – Charge- and concentration-dependent sorption behavior », *Chemosphere*, vol. 297, p. 134167, juin 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134167.
- [88] « RSDE STEU 3 - Substances dangereuses pour le milieu aquatique dans les rejets des stations d'épuration urbaines | Ineris ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/fr/rsde-steu-3-substances-dangereuses-milieu-aquatique-rejets-stations-epuration-urbaines>
- [89] « PFAS in influent, effluent and sewage sludge. Results of a monitoring campaign at eight WWTP's | STOWA ». Consulté le: 17 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.stowa.nl/publicaties/pfas-influent-effluent-and-sewage-sludge-results-monitoring-campaign-eight-wwtps>
- [90] S. Barisci et R. Suri, « Occurrence and removal of poly/perfluoroalkyl substances (PFAS) in municipal and industrial wastewater treatment plants », *Water Science and Technology*, vol. 84, n° 12, p. 3442-3468, déc. 2021, doi: 10.2166/wst.2021.484.

- [91] P. H. N. Vo *et al.*, « PFAS removal from landfill leachate by ozone foam fractionation: System optimization and adsorption quantification », *Water Research*, vol. 253, p. 121300, avr. 2024, doi: 10.1016/j.watres.2024.121300.
- [92] S. Verma, T. Lee, E. Sahle-Demessie, M. Ateia, et M. N. Nadagouda, « Recent advances on PFAS degradation *via* thermal and nonthermal methods », *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 13, p. 100421, mars 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.100421.
- [93] X. Dai, Z. Xie, B. Dorian, S. Gray, et J. Zhang, « Comparative study of PFAS treatment by UV, UV/ozone, and fractionations with air and ozonated air », *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, vol. 5, n° 11, p. 1897-1907, oct. 2019, doi: 10.1039/C9EW00701F.
- [94] C. Baresel *et al.*, « Pharmaceutical residues and other emerging substances in the effluent of sewage treatment plants ».
- [95] « Des bactéries permettant la biodégradation favoriseraient le largage des PFAS contenus dans les fertilisants », *Techniques de l'Ingénieur*. Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/des-bacteries-permettant-la-biodegradation-favoriserait-le-largage-des-pfas-contenus-dans-les-fertilisants-120941/>
- [96] T. Zhou *et al.*, « Occurrence, fate, and remediation for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sewage sludge: A comprehensive review », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 466, p. 133637, mars 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133637.
- [97] « SFSE ». Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.sfse.org/article/ressources/Fiches%20pratiques%20-%20Evaluation%20et%20gestion%20des%20PFAS%20%28Per%20et%20Poly%20Fluoro%20Alkyls%20Substances%29%20/useful_doc/0/lire-details/0/0/4/4/110
- [98] F. Karg, « ERP sensibles (Ecoles, Crèches) & Habitations et Diagnostics, Evaluation des Risques Toxicologiques et Traitements des PFAS, notamment les FTOH : Fluorotéломère-Alcools volatils / Public Site Use Scenarios (Schools, Kindergartens & Residences and Site Investigation, Toxicological Health Risk Assessments (TERQ) and Treatments of PFAS, especially volatile FTOH: Fluorotelomere Alcohols. INTERSOL 2022, Lyon / France: 21-23/06/2022, Congress Minutes. » [En ligne]. Disponible sur: https://www.saturne.net/mud/index.php?d=intersol2022_abstracts_pg
- [99] F. Karg, « Management of FTOH: Fluorotelomere Alcohols (volatile PFAS) in ambient air of public site use scenarios (schools, kindergartens) & residences: site investigation, toxicological health risk assessments (TERQ) / Gestion des FTOH: Fluorotéломère-Alcools (PFAS volatils) dans l'air ambiant des ERP sensibles (écoles, crèches) & habitations : diagnostics et évaluation des risques toxicologiques. AtmosFair, Lyon: 20 & 21/09/2022. Congress Minutes. » [En ligne]. Disponible sur: https://www.saturne.net/mud/index.php?d=atmosfair2022_program_abstracts
- [100] « Les blancs analytiques : définition et recommandations quant à leur utilisation | AQUAREF - Laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques ». Consulté le: 24 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aquaref.fr/blancs-analytiques-definition-recommandations-quant-leur-utilisation>
- [101] A. Iannone, F. Carriera, C. Di Fiore, et P. Avino, « Poly- and Perfluoroalkyl Substance (PFAS) Analysis in Environmental Matrices: An Overview of the Extraction and Chromatographic Detection Methods », *Analytica*, vol. 5, n° 2, Art. n° 2, juin 2024, doi: 10.3390/analytica5020012.
- [102] « Preventing Recalcitrant Organic Mobile Industrial chemicals for Circular Economy in the Soil-sediment-water system | PROMISCES Project | Fact Sheet | H2020 », CORDIS | European Commission. Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cordis.europa.eu/project/id/101036449>
- [103] « Method 1633 Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous, Solid, Biosolids, and Tissue Samples by LC-MS/MS ».
- [104] « Guide technique RSDE STEU - Campagne 2022 », 2022.
- [105] « 2024.04.05_Plan_PFAS.pdf ». Consulté le: 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2024.04.05_Plan_PFAS.pdf

- [106] A. C. Alder et J. van der Voet, « Occurrence and point source characterization of perfluoroalkyl acids in sewage sludge », *Chemosphere*, vol. 129, p. 62-73, juin 2015, doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.045.
- [107] « STOWA 2021-46 PFAS.pdf ». Consulté le: 2 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202021/STOWA%202021-46%20PFAS.pdf>
- [108] A. U. Rehman, M. Crimi, et S. Andreescu, « Current and emerging analytical techniques for the determination of PFAS in environmental samples », *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 37, p. e00198, mars 2023, doi: 10.1016/j.teac.2023.e00198.
- [109] « AQUAREF_2018_D1c2_2_Perfluores-MA74_VF.pdf ». Consulté le: 2 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aquaref.fr/system/files/AQUAREF_2018_D1c2_2_Perfluores-MA74_VF.pdf
- [110] « Aquaref_2013_D1b_INERIS_MA28_Perfluores_PFCs_boues_VF.pdf ». Consulté le: 2 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aquaref.fr/system/files/Aquaref_2013_D1b_INERIS_MA28_Perfluores_PFCs_boues_VF.pdf
- [111] E. F. Houtz et D. L. Sedlak, « Oxidative conversion as a means of detecting precursors to perfluoroalkyl acids in urban runoff », *Environ Sci Technol*, vol. 46, n° 17, p. 9342-9349, sept. 2012, doi: 10.1021/es302274g.
- [112] D. Thompson, N. Zolfigol, Z. Xia, et Y. Lei, « Recent progress in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) sensing: A critical mini-review », *Sensors and Actuators Reports*, vol. 7, p. 100189, juin 2024, doi: 10.1016/j.snr.2024.100189.
- [113] « Grapheal - Bringing to market graphene-based consumer electronics ». Consulté le: 24 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://grapheal.com/\[object\]](https://grapheal.com/[object])
- [114] « Guide technique RSDE STEU - Campagne 2022 », Dreal bassin Loire Bretagne, Agence de l'Eau Loire Bretagne, 2022.
- [115] « Législation/Permis d'environnement/Liste des projets, des installations et des activités classées ». Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://environnement.wallonie.be/legis/pe/pe006.htm>
- [116] « PFAS Treatment Solutions - Veolia ». Veolia, janvier 2024. Consulté le: 10 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.watertechnologies.fr/applications/pfas-remediation>
- [117] S. Yadav *et al.*, « Updated review on emerging technologies for PFAS contaminated water treatment », *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 182, p. 667-700, juin 2022, doi: 10.1016/j.cherd.2022.04.009.
- [118] O. US EPA, « PFAS Innovative Treatment Team (PITT) ». Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.epa.gov/chemical-research/pfas-innovative-treatment-team-pitt>
- [119] « POTENTIAL PFAS DESTRUCTION TECHNOLOGY: MECHANOCHEMICAL DEGRADATION », US EPA, janv. 2021. Consulté le: 8 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/pitt_research_brief_mechanochemical_final_jan_25_2020_508.pdf
- [120] « POTENTIAL PFAS DESTRUCTION TECHNOLOGY: PYROLYSIS AND GASIFICATION », US EPA, janv. 2021. Consulté le: 8 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/pitt_research_brief_pyrolysis_final_jan_27_2021_508.pdf
- [121] « FICHES PRATIQUES - EVALUATION ET GESTION DES PFAS (PER ET POLY FLUORO ALKYL SUBSTANCES) ». Societe Francophone de Santé et Environnement - La rigueur scientifique au service des publics, 23 novembre 2023. Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.sfse.org/article/ressources/Fiches%20pratiques%20-%20Evaluation%20et%20gestion%20des%20PFAS%20%28Per%20et%20Poly%20Fluoro%20Alkyls%20Substances%29%20/useful_doc/0/lire-details/0/0/4/4/110

10. Annexes

10.1. Annexe 1 : Principaux PFAS

Sigle	Nom	N°CAS	Famille	Nombre d'atome de carbone	Type de chaîne	Poids moléculaire	Log Sw (mol/L)	Log Kow	pKa	RPF (PFOA eq)	Liste SPGE	EDCH	Utilisation
TA/Tf OH	Acide triflique	1493-13-6	Autre	1	Ultra-courte						Non	Non	Produit de dégradation
C6O4	Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid	1190931-27-1 (1190931-41-9)	Autre	6	Courte	340,05				0,06	Oui	Non	Tensioactif fluoré, aide à la polymérisation dans la production de certains polymères fluorés, remplacement du PFOA
HFPO-DA/GenX	Acide hexafluoropropylène oxide dimer (GenX)	13252-13-6	Autre	6	Courte					0,06	Oui	Non	Remplacement du PFOA, emballages alimentaires, les peintures, les produits de nettoyage, les revêtements antiadhésifs, les tissus d'extérieur et la mousse anti-incendie.
(A)DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid	919005-14-4	Autre	7	Courte					0,03	Oui	Non	Antiadhésif
6:2 FTOH ; FHET	2-perfluorohexyl ethanol (6:2)	647-42-7	Autre	8	Longue	364,1				0,02	Oui	Non	Emballage alimentaire
6:2 FTS	Acide 6:2-Fluorotelomersulfonique	27619-97-2	Autre	8	Longue	428,16			1,31		Non	Non	Mousse anti-incendie

PFECH S	Perfluoroethylcy clohexane sulfonate	646-83-3	Autre	8	Longue	461,13		3,8			Non	Non	Produit de substitution du PFOS
FOSA/ PFOSA	Perfluorooctanes ulfonamide	754-91-6	Autre	8	Longue	499,14					Non	Non	Produit de substitution du PFOS
8:2 FTOH ; FOET	2-perfluorooctyl ethanol (8:2)	678-39-7	Autre	10	Longue				0,04	Oui	Non		Emballage alimentaire
8:2 FTS	Acide 8:2- Fluorotelomersul fonique	27619-96-1	Autre	10	Longue	550,16					Non	Non	Mousse anti-incendie
F-53B	6:2 chlorinated polyfluoroalkyl ether sulfonate	73606-19-6	Autre	10	Longue	670,69					Non	Non	Produit de substitution du PFOS (utilisé en Chine)
10:2FT OH	2-perfluorooctyl ethanol (10:2)	865-86-1	Autre	12	Longue						Non	Non	Emballage alimentaire
6:2 FtTAo S	6:2 Fluorotelomer Thioether Amido Sulfonic Acid	62880-95-9	Autre	15	Longue	586,4					Non	Non	Mousse anti-incendie
8:2 diPAP	8:2 polyfluoroalkylph osphate diester	678-41-1	Autre	20	Longue	990,2					Non	Non	Cosmétique, produit d'hygiène, emballage alimentaire
10:2 diPAP	10:2 polyfluoroalkylph osphate diester	1895-26-7	Autre	24	Longue	1190,2 3					Non	Non	Cosmétique, produit d'hygiène, emballage alimentaire

TFA	Acide trifluoroacétique	76-05-1	PFCA	2	Ultra-courte					Non	Non	Le TFA est un module de synthèse pour les médicaments (par ex. la sitagliptine) et les produits phytosanitaires (par ex. le flufénacet). Il est également appliqué en laboratoire pour l'analyse des peptides. Il est utilisé par ailleurs comme solvant dans des processus industriels spéciaux et comme catalyseur dans les réactions de polymérisation et de condensation. Produit de dégradation issu d'autres PFAS, de gaz fluorés, de pesticides, de biocides ou médicaments contenant du fluor (famille des organo-fluorés)
PFPrA	Acide perfluoropropanoïque	422-64-0	PFCA	3	Ultra-courte	162,03			0,38	Non	Non	Fluide réfrigérant

PFBA	Acide perfluorobutanoique	375-22-4	PFCA	4	Courte	214,1	0,42	2,82	0,4	0,05	Oui	Oui	Produits pour résister à la chaleur, aux taches, à l'huile, à la graisse, à l'eau. Il est également utilisé pour fabriquer des films photographiques. Il a été utilisé comme substitut aux acides perfluoroalkylcarboxyliques à chaîne plus longue dans les produits de consommation. Produit de dégradation d'autres PFAS
------	------------------------------	----------	------	---	--------	-------	------	------	-----	------	-----	-----	--

PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	2706-90-3	PFCA	5	Courte	264,1	-0,37	3,43	0,17	0,03/0,05	Oui	Oui	Produits pour résister à la chaleur, aux taches, à l'huile, à la graisse, à l'eau. Le PFPeA est un produit de dégradation des revêtements antitaches et anti-graisse sur les emballages alimentaires, les canapés et les tapis. Agent émulsifiant pour dispersion de polymères, mousses d'extinction, antitaches, additifs pour peintures et revêtements.
-------	----------------------------	-----------	------	---	--------	-------	-------	------	------	-----------	-----	-----	---

PFHxA	Acide perfluoro- n-hexanoïque	307-24-4	PFCA	6	Courte	314,1	-1,16	4,06	-0,16	0,01	Oui	Oui	Emballages alimentaires et produits résistants à la chaleur, aux tâches, à l'huile, à la graisse, à l'eau. Le PFHxA est un PFAS courant considéré comme une impureté produite par inadvertance lors de la fabrication d'autres PFAS. C'est également un produit de dégradation des lubrifiants, des revêtements sur les emballages alimentaires et des produits ménagers.
-------	----------------------------------	----------	------	---	--------	-------	-------	------	-------	------	-----	-----	--

PFHpA	Acide perfluoro-n-heptanoïque	375-85-9	PFCA	7	Courte	364,1	-1,94	4,67	-0,19	0,505/ 1	Oui	Oui	Emballages alimentaires et produits résistants à la chaleur, aux tâches, à l'huile, à la graisse, à l'eau Le PFHpA est un produit de dégradation mineur de nombreux PFAS à longue chaîne.
-------	-------------------------------	----------	------	---	--------	-------	-------	------	-------	-------------	-----	-----	--

PFOA	Acide perfluoro- octanoïque	335-67-1	PFCA	8	Longue	414,1	-1,93	5,3	-0,2	1	Oui	Oui	<p>Applications de lutte contre l'incendie, cosmétiques, graisses et lubrifiants, peintures, cirages et adhésifs</p> <p>Le PFOA est utilisé dans plusieurs applications industrielles, notamment la moquette, les tissus d'ameublement, les vêtements, la cire pour sols, les textiles, la mousse anti-incendie et les produits d'étanchéité. Le PFOA sert de tensioactif dans la polymérisation en émulsion de polymères fluorés et d'élément de base pour la synthèse de composés, de polymères et de matériaux polymères substitués par des perfluoroalkyles.</p> <p>Il est également formé par la dégradation de précurseurs tels que certains fluorotélomères. Le PFOA est utilisé comme tensioactif car il peut abaisser la tension superficielle de l'eau davantage que les tensioactifs d'hydrocarbures tout en ayant une stabilité exceptionnelle grâce à son groupe de queue perfluoroalkyle.</p>
------	--------------------------------	----------	------	---	--------	-------	-------	-----	------	---	-----	-----	---

PFNA	Acide perfluoronanoique	375-95-1	PFCA	9	Longue	414,07	-3,55	5,48	-0,21	10	Oui	Oui	Les sels sont utilisés comme produits chimiques tensioactifs et leurs dérivés sont utilisés comme agents mouillants, dispersants, émulsifiants et moussants. Le PFNA est utilisé comme tensioactif pour la production du fluorure de polyvinylidène, un polymère fluoré. (Utilisation principalement au Japon) Il est considéré comme un produit de dégradation probable de nombreux autres composés. Également utilisé dans les cosmétiques
------	-------------------------	----------	------	---	--------	--------	-------	------	-------	----	-----	-----	--

PFDA	Acide perfluorodecanoïque	335-76-2	PFCA	10	Longue	464,08	-4,31	6,5	2,61	7	Oui	Oui	Produits pour résister à la chaleur, aux taches, à l'huile, à la graisse, à l'eau Le PFDA a été utilisé dans les revêtements antitaches et anti-graisse sur les emballages alimentaires, les meubles, les tissus d'ameublement et les tapis.
PFUnDA/PFU nA	Acide perfluoroundecanoïque	2058-94-8	PFCA	11	Longue	564,09	-5,13	7,15	3,12	4	Oui	Oui	Produits pour résister à la chaleur, aux taches, à l'huile, à la graisse, à l'eau
PFDoDA/PFD oA	Acide perfluorododecanoïque	307-55-1	PFCA	12	Longue	614,1	-5,94	10,16		3	Oui	Oui	Agent mouillant et ignifuge
PFT rDA	Acide perfluorotridecanoïque	72629-94-8	PFCA	13	Longue					1,65/3	Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFTDA/PFT eDA	Acide perfluorotetradecanoïque	376-06-7	PFCA	14	Longue	714,11	-7,42	8,9		0,3	Oui	Non	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFHxD A	Acide perfluorohexadecanoïque	67905-19-5	PFCA	16	Longue	814,12				0,02	Oui	Non	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFO DA	Acide perfluorooctadecanoïque	16517-11-6	PFCA	18	Longue	914,14			0,52	0,02	Oui	Non	https://www.scbt.com/fr/p/perfluorostearic-acid-16517-11-6
PF eTS	Sulfonate de perfluoroéthane	354-88-1	PFSA	2	Ultra-courte						Non	Non	Fluide réfrigérant

PFPrS	Sulfonate de perfluoropropane	423-41-6	PFSA	3	Ultra-courte	250,09					Non	Non	Fluide réfrigérant
PFBS	Acide perfluorobutane sulfonique	375-73-5	PFSA	4	Courte	300,1	-1,53	1,82	0,14	0,001	Oui	Oui	Additif résistant aux taches, anti-adhésif, surfactant, insecticides, industrie pharmaceutique
PFPeS	Acide perfluoropentane sulfonique	2706-91-4	PFSA	5	Courte	350,1	-2,9	2,49	<0,3	0,3005 /0,6	Oui	Oui	Produits pour résister à la chaleur, aux taches, à l'huile, à la graisse, à l'eau
PFHxS	Acide perfluorohexane sulfonique	355-46-4	PFSA	6	Longue	400,1	-4,27	3,16	0,14	0,6	Oui	Oui	Mousse anti-incendie, pour réaliser des revêtements hydrofuges et antitaches pour les tapis, le papier et les tissus
PFHpS	Acide perfluoroheptane sulfonique	375-92-8	PFSA	7	Longue	450,1	-5,63	3,82	<0,3	1,3/2	Oui	Oui	Agent tensioactif
PFOS	Acide perfluorooctane sulfonique	1763-23-1	PFSA	8	Longue	500,1	-6,68	4,49	-3,27	2	Oui	Oui	Mousse filmogène aqueuse (AFFF), dans les agents d'imprégnation pour textiles, papiers et cuirs ; dans les cires, les cirages, les peintures, les vernis et les produits de nettoyage à usage général ; dans les surfaces métalliques et les tapis.
PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	68259-12-1	PFSA	9	Longue					2	Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFDS	Acide perfluorodécane sulfonique	335-77-3	PFSA	10	Longue					2	Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages

													alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFUnD S	Acide perfluoroundecane sulfonique	749786-16-1	PFSA	11	Longue	650,15					Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFDod S	Acide perfluorododecane sulfonique	79780-39-5	PFSA	12	Longue						Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFTrD S	Acide perfluorotridecane sulfonique	791563-89-8	PFSA	13	Longue						Oui	Oui	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
PFTeD S	Perfluorotetradecane sulfonique	1379460-39-5	PFSA	14	Longue						Non	Non	Produits hydrofuges, antitaches et anti-graisses pour emballages alimentaires, tapis, meubles et vêtements
10:2 FTS	Acide 10:2-Fluorotelomersulfonique	108026-35-3		12	Longue	650,18					Non	Non	Mousse anti-incendie

Les acides carboxyliques perfluorés à longue chaîne (PFCA en C9-21) sont envisagés pour inclusion dans la Convention de Stockholm et leur élimination à l'échelle mondiale.

Reach : Les acides carboxyliques perfluorés (PFCA en C9-14), leurs sels et leurs précurseurs sont soumis à des restrictions dans l'UE/EEE à partir de février 2023

10.2. Annexe 2 : Stations d'épuration rapportées au titre de la Directive sur les Eaux Résiduaires Urbaine en 2022

Code Station	Nom de la station	Province	Capacité nominale (EH)	Charge Entrante (EH)	Conformité DERU
BERW6207901	LIEGE OUPEYE	Prov. Liège	401 850	165 675	Conforme
BERW5306501	WASMUEL	Prov. Hainaut	250 000	97 788	Conforme
BERW5201103	MONTIGNIES-SUR-SAMBRE	Prov. Hainaut	200 000	127 839	Conforme
BERW5400701	MOUSCRON versant ESPIERRES	Prov. Hainaut	200 000	43 048	Conforme
BERW6206301	LIEGE SCLESSIN	Prov. Liège	150 000	122 602	Conforme
BERW2511201	BASSE WAVRE (Dyle)	Prov. Brabant Wallon	146 000	40 897	Conforme
BERW5207401	ROSELIES	Prov. Hainaut	127 000	73 925	Conforme
BERW2509101	ROSIERES (LASNE)	Prov. Brabant Wallon	112 500	18 496	Conforme
BERW6305804	WEGNEZ	Prov. Liège	99 000	79 996	Conforme
BERW9209404	NAMUR-BRUMAGNE	Prov. Namur	93 100	43 913	Conforme
BERW2501503	VALLEE DU HAIN (L'ORCHIS)	Prov. Brabant Wallon	93 000	28 278	Conforme
BERW5201104	MARCHIENNE-AU-PONT	Prov. Hainaut	80 000	55 921	Conforme
BERW5401001	ARMENTIERES (F)	Prov. Hainaut	65 000	27 991	Conforme
BERW5206301	SENEFFE (Soudromont)	Prov. Hainaut	58 500	42 144	Conforme
BERW6100301	AMAY	Prov. Liège	54 200	13 459	Conforme
BERW6206302	LIEGE (GROSSES BATTES)	Prov. Liège	53 137	11 968	Conforme
BERW5205505	VIESVILLE CANAL	Prov. Hainaut	46 000	22 063	Conforme
BERW5708124	FROYENNES	Prov. Hainaut	45 000	38 876	Conforme
BERW9214001	MORNIMONT	Prov. Namur	45 000	42 212	Conforme
BERW2507201	NIVELLES	Prov. Brabant Wallon	44 450	27 445	Conforme
BERW6303501	HERVE	Prov. Liège	36 500	39 562	Conforme

BERW00001 04	GRIMONPONT (F)	Prov. Hainaut	32 000	17 395	Conforme
BERW81001 01	ARLON	Prov. Luxembourg (BE)	31 500	47 146	Conforme
BERW52011 05	JUMET BORDIA	Prov. Hainaut	31 500	13 355	Conforme
BERW62060 03	LANTIN	Prov. Liège	31 500	30 838	Conforme
BERW63058 02	GOFFONTAINE	Prov. Liège	27 000	8 512	Conforme
BERW83034 01	MARCHE-EN-FAMENNE	Prov. Luxembourg (BE)	27 000	14 135	Conforme
BERW63004 01	MEMBACH	Prov. Liège	25 416	12 152	Conforme
BERW25105 03	TUBIZE	Prov. Brabant Wallon	25 000	21 269	Conforme
BERW82003 01	BASTOGNE RHIN	Prov. Luxembourg (BE)	24 750	7 291	Conforme
BERW62022 01	EMBOURG	Prov. Liège	24 300	7 068	Conforme
BERW92045 01	FLOREFFE	Prov. Namur	23 000	3 773	Conforme
BERW55022 06	SAINT-VAAST	Prov. Hainaut	22 500	23 039	Conforme
BERW63088 03	LA GUEULE AVAL	Prov. Liège	22 275	11 703	Conforme
BERW61080 01	ENGIS	Prov. Liège	22 200	6 396	Conforme
BERW52011 01	ROUX-CANAL	Prov. Hainaut	21 600	24 492	Conforme
BERW91114 01	ROCHEFORT	Prov. Namur	21 330	16 647	Conforme
BERW51004 01	ATH	Prov. Hainaut	20 250	11 453	Conforme
BERW25048 01	JODOIGNE	Prov. Brabant Wallon	20 000	7 588	Conforme
BERW25037 02	GREZ-DOICEAU	Prov. Brabant Wallon	20 000	1 845	Conforme
BERW57062 01	PONT BLEU	Prov. Hainaut	20 000	15 278	Conforme
BERW00001 02	COMINES	Prov. Hainaut	20 000	35 304	Conforme
BERW92003 05	ANDENNE (Seilles)	Prov. Namur	20 000	14 654	Conforme
BERW92142 01	CORROY-LE-CHATEAU	Prov. Namur	19 800	12 137	Conforme
BERW55022 02	TRIVIERES	Prov. Hainaut	19 000	10 586	Non conforme
BERW55022 01	BOUSSOIT	Prov. Hainaut	19 000	14 014	Conforme

BERW53028 01	FRAMERIES	Prov. Hainaut	19 000	9 861	Conforme
BERW25110 01	WATERLOO	Prov. Brabant Wallon	18 000	13 282	Conforme
BERW56087 01	MORLANWELZ	Prov. Hainaut	18 000	14 264	Conforme
BERW63049 01	MALMEDY	Prov. Liège	18 000	16 750	Conforme
BERW85047 01	DAMPICOURT	Prov. Luxembourg (BE)	16 650	10 580	Conforme
BERW81004 01	ATHUS	Prov. Luxembourg (BE)	15 750	10 605	Conforme
BERW91030 01	CINEY	Prov. Namur	14 400	13 435	Conforme
BERW57064 01	PERUWELZ	Prov. Hainaut	14 000	10 032	Conforme
BERW62122 01	LA BROUCK	Prov. Liège	13 600	2 312	Conforme
BERW55010 01	MARCQ	Prov. Hainaut	13 500	8 391	Conforme
BERW91141 01	DINANT	Prov. Namur	13 500	2 852	Conforme
BERW92094 05	PONT DE WEPION	Prov. Namur	13 450	3 269	Conforme
BERW57027 01	PAS-A-WASMES	Prov. Hainaut	13 000	8 807	Conforme
BERW25068 01	LOUVAIN-LA-NEUVE	Prov. Brabant Wallon	13 000	3 579	Conforme
BERW56078 03	THUIN - VILLE BASSE	Prov. Hainaut	12 500	3 735	Conforme
BERW55023 01	LESSINES	Prov. Hainaut	12 000	7 440	Conforme
BERW93090 03	MARIEMBOURG-NISMES	Prov. Namur	10 800	3 852	Conforme
BERW57081 01	CHERCQ	Prov. Hainaut	10 800	8 940	Conforme
BERW52021 02	WANFERCEE-BAULET	Prov. Hainaut	10 800	5 555	Conforme
BERW25068 02	CHASTRE	Prov. Brabant Wallon	10 500	3 281	Conforme
BERW83031 04	LA ROCHE	Prov. Luxembourg (BE)	10 350	1 011	Conforme
BERW83012 01	BOMAL (DURBUY)	Prov. Luxembourg (BE)	10 170	2 987	Conforme
BERW92140 02	SAINT-MARTIN	Prov. Namur	10 000	1 386	Conforme
BERW56001 01	ANDERLUES	Prov. Hainaut	9 900	4 865	Conforme
BERW52010 01	CHAPELLE-LEZ-HERLAIMONT	Prov. Hainaut	9 900	3 762	Conforme

BERW91141 02	GODINNE	Prov. Namur	9 800	2 436	Conforme
BERW25031 01	GENAPPE	Prov. Brabant Wallon	9 800	3 390	Conforme
BERW57094 01	LEUZE-EN-HAINAUT	Prov. Hainaut	9 720	10 943	Conforme
BERW63084 02	WELKENRAEDT	Prov. Liège	9 500	4 025	Conforme
BERW53020 01	ELOUGES	Prov. Hainaut	9 333	4 090	Conforme
BERW55040 01	SOIGNIES (BIAMONT)	Prov. Hainaut	9 333	8 805	Conforme
BERW62009 01	AYWAILLE	Prov. Liège	9 050	2 615	Conforme
BERW84043 01	NEUFCHATEAU	Prov. Luxembourg (BE)	9 000	2 409	Conforme
BERW64074 01	WAREMME	Prov. Liège	9 000	19 757	Conforme
BERW56086 01	HAM-SUR-HEURE	Prov. Hainaut	8 900	913	Conforme
BERW64056 01	HODEIGE (S/YERNE)	Prov. Liège	8 890	8 381	Conforme
BERW62099 01	SOUMAGNE	Prov. Liège	8 865	5 743	Conforme
BERW62006 02	AWANS	Prov. Liège	8 640	5 361	Conforme
BERW64034 05	AVERNAS-LE-BAUDOIN	Prov. Liège	8 280	6 386	Conforme
BERW62060 01	WIHOGNE	Prov. Liège	8 280	1 684	Conforme
BERW82032 01	VIELSALM	Prov. Luxembourg (BE)	8 100	3 419	Conforme
BERW56022 03	SOLRE S/SAMBRE	Prov. Hainaut	8 100	4 766	Conforme
BERW62038 01	RETINNE-LA-JULIENNE	Prov. Liège	8 100	4 864	Conforme
BERW25107 02	VILLERS-LA-VILLE	Prov. Brabant Wallon	8 000	1 438	Conforme
BERW57093 01	HOLLAIN	Prov. Hainaut	8 000	6 503	Conforme
BERW57027 02	ESTAIMPUIS	Prov. Hainaut	8 000	6 800	Conforme
BERW84009 01	BERTRIX LAGUNAGE	Prov. Luxembourg (BE)	7 650	4 493	Conforme
BERW93022 03	SAINT-AUBIN FLORENNES	Prov. Namur	7 650	2 972	Conforme
BERW63073 08	STAVELOT	Prov. Liège	7 560	1 975	Conforme
BERW55050 01	ECAUSSINNES	Prov. Hainaut	7 500	4 077	Conforme

BERW55004 02	BRAINE-LE-COMTE	Prov. Hainaut	7 333	6 428	Conforme
BERW63003 01	AUBEL	Prov. Liège	7 200	9 159	Conforme
BERW63067 01	SAINT-VITH	Prov. Liège	7 086	13 848	Conforme
BERW25005 02	HAMME-MILLE	Prov. Brabant Wallon	7 000	1 982	Conforme
BERW57081 07	WARCHIN	Prov. Hainaut	7 000	4 501	Conforme
BERW52022 01	FONTAINE-L'EVEQUE	Prov. Hainaut	7 000	4 319	Conforme
BERW52021 01	FLEURUS	Prov. Hainaut	7 000	7 757	Conforme
BERW84010 01	BOUILLON	Prov. Luxembourg (BE)	6 750	1 870	Conforme
BERW62032 01	ESNEUX	Prov. Liège	6 750	3 385	Conforme
BERW51004 03	GHISLENGHIEN	Prov. Hainaut	6 500	5 154	Conforme
BERW00006 01	MARTELANGE (L)	Prov. Luxembourg (BE)	6 390	1 359	Conforme
BERW25120 01	ORP-LE-GRAND	Prov. Brabant Wallon	6 300	1 619	Conforme
BERW62119 01	SAINT-REMY	Prov. Liège	6 200	2 710	Conforme
BERW84059 01	SAINT-HUBERT	Prov. Luxembourg (BE)	6 000	1 345	Conforme
BERW25118 01	HELECINE	Prov. Brabant Wallon	6 000	1 788	Conforme
BERW53053 01	HAVRE	Prov. Hainaut	6 000	3 426	Conforme
BERW62060 04	FEXHE-SLINS	Prov. Liège	5 850	1 249	Conforme
BERW85026 01	MUSSON	Prov. Luxembourg (BE)	5 670	3 166	Conforme
BERW25044 02	ITTRE	Prov. Brabant Wallon	5 600	945	Conforme
BERW53053 02	OBOURG	Prov. Hainaut	5 500	2 800	Conforme
BERW84077 02	LIBRAMONT VIERRE	Prov. Luxembourg (BE)	5 490	1 787	Conforme
BERW25123 01	REBECQ	Prov. Brabant Wallon	5 400	984	Conforme
BERW85011 03	FLORENVILLE	Prov. Luxembourg (BE)	5 400	2 061	Conforme
BERW81004 02	AUBANGE	Prov. Luxembourg (BE)	5 400	3 650	Conforme
BERW92035 14	EGHEZEE	Prov. Namur	5 175	2 312	Conforme

BERW51014 01	CHIEVRES	Prov. Hainaut	5 000	1 229	Conforme
BERW64034 01	WANSIN	Prov. Liège	5 000	1 430	Conforme
BERW52063 03	FELUY (NIE-PRE)	Prov. Hainaut	5 000	1 202	Conforme
BERW62121 02	NEUVILLE	Prov. Liège	4 950	770	Conforme
BERW63048 01	LONTZEN	Prov. Liège	4 700	2 598	Conforme
BERW62100 01	LOUVEIGNE	Prov. Liège	4 617	92	Conforme
BERW93010 01	CERFONTAINE	Prov. Namur	4 500	912	Conforme
BERW56016 01	VIRELLES	Prov. Hainaut	4 500	2 364	Conforme
BERW56005 01	LEVAL-CHAUDEVILLE	Prov. Hainaut	4 500	1 162	Conforme
BERW51008 03	BASECLES	Prov. Hainaut	4 500	4 148	Conforme
BERW53070 01	BAUDOUR CANAL	Prov. Hainaut	4 500	2 019	Conforme
BERW53068 02	QUIEVRAIN	Prov. Hainaut	4 333	6 322	Conforme
BERW92048 02	FOSES-LA-VILLE	Prov. Namur	4 200	1 727	Conforme
BERW64074 02	LANTREMANGE	Prov. Liège	4 050	1 131	Conforme
BERW51009 01	BLATON	Prov. Hainaut	4 000	2 957	Conforme
BERW53053 10	SPIENNES - SAINT-SYMPHORIEN	Prov. Hainaut	4 000	4 524	Non conforme
BERW56086 02	NALINNES-MOULIN	Prov. Hainaut	4 000	2 131	Conforme
BERW53044 04	ERBISOEUL	Prov. Hainaut	3 800	4 239	Conforme
BERW62100 03	SPRIMONT	Prov. Liège	3 780	550	Conforme
BERW84077 15	LIBRAMONT LHOMME	Prov. Luxembourg (BE)	3 780	1 593	Conforme
BERW92087 01	METTET	Prov. Namur	3 600	1 458	Conforme
BERW83028 02	HOTTON	Prov. Luxembourg (BE)	3 600	2 109	Conforme
BERW51008 01	BELOEIL	Prov. Hainaut	3 600	1 244	Conforme
BERW82014 01	HOUFFALIZE	Prov. Luxembourg (BE)	3 600	1 789	Conforme
BERW85007 02	IZEL	Prov. Luxembourg (BE)	3 600	927	Conforme

BERW52015 01	SOUVRET CHENOIT	Prov. Hainaut	3 600	5 564	Conforme
BERW91013 01	BEAURAING (Gozin)	Prov. Namur	3 600	1 937	Conforme
BERW25023 02	SART-MESSIRE-GUILLAUME	Prov. Brabant Wallon	3 600	697	Conforme
BERW91114 02	HAN-SUR-LESSE	Prov. Namur	3 600	391	Conforme
BERW55035 01	ROEULX SUD	Prov. Hainaut	3 500	4 206	Conforme
BERW93088 02	WALCOURT	Prov. Namur	3 500	561	Conforme
BERW53070 02	SIRAULT	Prov. Hainaut	3 500	670	Conforme
BERW51008 04	QUEVAUCAMPS	Prov. Hainaut	3 500	2 139	Conforme
BERW57081 08	GAURAIN-RAMECROIX	Prov. Hainaut	3 465	2 173	Conforme
BERW52025 02	LOVERVAL-HAIES	Prov. Hainaut	3 300	1 797	Conforme
BERW53039 01	HENSIES POMMEROEUL	Prov. Hainaut	3 150	769	Conforme
BERW93088 01	SOMZEE-LANEFFE	Prov. Namur	3 150	804	Conforme
BERW92141 01	RHISNES	Prov. Namur	3 150	1 024	Conforme
BERW25084 01	PERWEZ	Prov. Brabant Wallon	3 150	6 333	Conforme
BERW64056 02	OREYE	Prov. Liège	3 150	896	Conforme
BERW56016 02	BAILEUX	Prov. Hainaut	3 150	7 714	Conforme
BERW51009 02	BERNISSART	Prov. Hainaut	3 100	1 797	Conforme
BERW52010 02	GODARVILLE	Prov. Hainaut	3 000	1 211	Conforme
BERW25123 02	QUENAST	Prov. Brabant Wallon	3 000	1 071	Conforme
BERW52021 13	FLEURJOUX	Prov. Hainaut	3 000	2 229	Conforme
BERW55004 01	HENNUYERES	Prov. Hainaut	3 000	1 200	Conforme
BERW25107 03	SART-DAMES-AVELINES	Prov. Brabant Wallon	2 900	585	Conforme
BERW63013 06	BUTGENBACH	Prov. Liège	2 880	1 427	Conforme
BERW56086 03	MARBAIX	Prov. Hainaut	2 800	977	Conforme
BERW62006 01	FOOZ	Prov. Liège	2 700	1 193	Conforme

BERW93056 01	PHILIPPEVILLE	Prov. Namur	2 700	1 255	Conforme
BERW51065 02	FRASNES	Prov. Hainaut	2 650	2 931	Conforme
BERW57064 02	WIERS	Prov. Hainaut	2 600	1 528	Conforme
BERW85046 01	HABAY-LA-NEUVE	Prov. Luxembourg (BE)	2 520	487	Conforme
BERW51008 05	GRANDGLISE	Prov. Hainaut	2 500	1 104	Conforme
BERW53039 02	THULIN	Prov. Hainaut	2 500	1 190	Conforme
BERW83034 02	AYE	Prov. Luxembourg (BE)	2 430	880	Conforme
BERW84075 01	WELLIN	Prov. Luxembourg (BE)	2 340	427	Conforme
BERW00002 01	AIX-SUD (D)	Prov. Liège	2 300	1 250	Conforme
BERW52074 02	TAILLANDIER	Prov. Hainaut	2 250	2 101	Conforme
BERW64063 01	MOMALLE	Prov. Liège	2 250	2 094	Conforme
BERW84050 03	PALISEUL	Prov. Luxembourg (BE)	2 200	782	Conforme
BERW63058 01	LE BOLA	Prov. Liège	2 070	674	Conforme
BERW61024 01	HAMOIR	Prov. Liège	2 025	444	Conforme
BERW93090 01	OLLOY-SUR-VIROIN	Prov. Namur	1 890	213	Conforme
BERW62032 02	CHAWRESSE	Prov. Liège	1 890	177	Conforme
BERW62121 01	BUTAY	Prov. Liège	1 800	540	Conforme
BERW53044 01	JURBISE	Prov. Hainaut	1 800	155	Conforme
BERW92097 01	HAILLOT	Prov. Namur	1 800	1 064	Conforme
BERW81001 02	WALTZING	Prov. Luxembourg (BE)	1 620	2 096	Conforme
BERW62022 02	LA WALTINNE	Prov. Liège	1 350	463	Conforme
BERW51004 02	MAFFLE	Prov. Hainaut	1 350	1 105	Non conforme
BERW92048 01	BAMBOIS	Prov. Namur	1 260	486	Conforme
BERW92035 04	LEUZE	Prov. Namur	1 200	185	Conforme
BERW56044 01	LOBBES (4 d'GIN'S-Avigroup)	Prov. Hainaut	1 100	900	Conforme

BERW85046 02	HABAY-LA-VIEILLE	Prov. Luxembourg (BE)	900	334	Conforme
BERW85011 01	MANDELAUVAUX	Prov. Luxembourg (BE)	720	252	Conforme
BERW84009 03	BERTRIX COURBEURE	Prov. Luxembourg (BE)	540	370	Conforme
BERW84009 02	BERTRIX BLEZY	Prov. Luxembourg (BE)	540	407	Conforme
BERW56044 02	LOBBES (Chemin d'Houpes)	Prov. Hainaut	540	279	Conforme
BERW57072 01	TAINTIGNIES	Prov. Hainaut	450	564	Conforme
BERW25044 03	BOIS DES NONNES	Prov. Brabant Wallon	150	430	Conforme

10.3. Annexe 3 : Identification des laboratoires d'analyses des PFAS en France et en Suisse

Six laboratoires d'analyses environnementales privés et trois laboratoires de recherche ont été consultés pour l'analyse des PFAS dans les eaux usées et dans les boues de stations d'épurations.

Ces laboratoires ont été consultés sur la base des questions ci-dessous :

- Est-ce que le laboratoire réalise l'analyse des PFAS dans les matrices eaux usées et boues ?
- Quels sont les PFAS analysés ?
- Est-ce que ces analyses sont accréditées par le service d'accréditation du pays ?
- Quelle est la limite de quantification (LQ) pour chaque molécule analysée ?
- Quelle est la méthode analytique utilisée ?
- Quel est le coût par molécule analysée ?
- Quelles sont les préconisations en termes d'échantillonnage ? de volume à prélever ? de type de flaconnage à privilégier ? de stockage ? et de transport ?

10.3.1 Les laboratoires d'analyse privés en France

Les laboratoires d'analyses privés consultés en France sont les suivants :

- Le laboratoire IANESCO sis 6 rue Carol Heitz, 86000 Poitiers-France,
- Le laboratoire CARSO- CAE sis 17 rue du Doyen Denis Leroy, 35700 Rennes-France,
- Le laboratoire WESSLING sis 3 Avenue de Norvège, 91140 Villebon-sur-Yvette-France,
- Le laboratoire QUALYSE sis 5 Allées de l'Océan, 17000 La Rochelle- France.

10.3.1.1 Le laboratoire IANESCO

Ce laboratoire est en mesure d'analyser 28 PFAS dans les eaux usées et 24 PFAS dans les boues listés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 40 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire IANESCO en France avec leur LQ

MOLECULE	NOM COMPLET	CAS	LQ (ng/L) en Eau usée	LQ (µg/kg) BOUE pour MS 100%
PFBA	Acide perfluorobutanoïque	375-22-4	10	10
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	2706-90-3	10	10
PFBS	Acide perfluorobutane sulfonique	59933-66-3	10	10
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque	307-24-4	10	10
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque	375-85-9	10	10
PFHxS	Acide perfluorohexane sulfonique	3871-99-6	10	10
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	335-67-1	10	10
PFNA	Acide perfluorononanoïque	375-95-1	10	10
PFOS	Acide perfluorooctane sulfonique	2795-39-3	10	10
PFDA	Acide perfluorodécanoïque	335-76-2	10	10
PFDODA	Acide perfluorododécanoïque	307-55-1	10	10
PFHpS	Acide perfluoroheptane sulfonique	375-92-8	10	10
PFTrDA	Acide perfluorotridecanoïque	72629-94-8	50	10
PFUNDA	Acide perfluoroundécanoïque	2058-94-8	10	10
PFUDS	Acide perfluoroundécane sulfonique	441296-91-9	50	10
PFTrDS	Acide perfluorotridecane sulfonique	174675-49-1	50	10
PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	474511-07-4	10	10
PFDS	Acide perfluorodécane sulfonique	335-77-3	50	10
PFPeS	Acide perfluoropentane sulfonique	2706-91-4	10	10
PFDoS	Acide perfluorododécane sulfonique	79780-39-5	10	10
PFTeDA	Acide perfluorotétradécanoïque	376-06-7	50	10
PFHxDA	Acide perfluorohexadécanoïque	67905-19-5	50	10
PFODA	Acide perfluorooctadécanoïque	16517-11-6	10	10
4HPFOS ou 6:2 FTS	Acide 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridécafluorooctane-1-sulfonique	27619-97-2	10	-
ADONA	Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque	9190005-14-4	10	-
C6O4	Perfluoro([5-méthoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid	1190931-27-1	50	-

GenX	Acide 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy) propanoïque	13252-13-6	20	-
6:2-FTOH	2-perfluorohexyl ethanol (6:2)	647-42-7	50	-
8:2-FTOH	2-perfluorooctyle ethanol (8:2)	678-39-7	100	-

Au sein de ce laboratoire, toutes les molécules sont analysées par LC-MS/MS, à l'exception des deux dernières (6 : 2 – FTOH et 8:2-FTOH) qui sont plus volatiles et qui sont analysées par GC-MS/MS.

Ce laboratoire est accrédité COFRAC pour les analyses réalisées sur les eaux usées, mais ne l'est pas pour les boues. Il est accrédité sur les 20 premières molécules surlignées en bleu dans le tableau.

Les limites de quantification (LQ) indiquées dans le tableau, pour les eaux usées et les boues, ne sont atteintes que pour des analyses hors accréditation COFRAC.

Les LQ en accréditation sont plus élevées, celles-ci sont à 100 ng/L pour chaque molécule prise individuellement.

Ce laboratoire propose également l'analyse AOF, permettant une estimation de la quantité totale de substances PFAS présente dans les eaux usées, en équivalent fluorures avec une LQ de 2 µg/L.

Pour le prélèvement, le laboratoire recommande pour les eaux usées un prélèvement 24h asservi au débit lorsque cela est possible. Si ce n'est pas possible, il recommande que ce dernier soit asservi au temps. Le prélèvement ponctuel est envisagé en dernier recours lorsque les deux premiers modes de prélèvements ne sont pas possibles, selon les recommandations de la réglementation en vigueur régie par l'arrêté du 20 juin 2023 [9]. Afin de récolter les échantillons d'eau usée, le laboratoire préconise d'utiliser 1 ou 2 flacons de 500 mL en plastique, conditionné(s) au thiosulfate 0,15% v/v. Pour les boues, il utilise un bocal de 1 L en verre sans conditionnement spécifique.

Les différents échantillons sont stockés au frais et à l'abri de la lumière en attendant leur envoi pour analyse. Leur transport est réalisé dans des glacières afin de respecter la chaîne de froid et conserver l'échantillon.

Le flaconnage ainsi que les glacières sont fournis par le laboratoire.

Le coût analytique dépend du nombre d'échantillons et du nombre de PFAS à analyser. De manière générale les prix pratiqués par ce laboratoire sont les suivants :

Pour les eaux usées :

- 20 PFAS (accrédités) pour un échantillon : 175 euros + 145 euros si analyse AOF,
- 28 PFAS (20 accrédités sur les 28) pour 1 échantillon : 195 euros + 145 euros si analyse AOF.

Pour les boues :

- 24 PFAS : 190 euros.

Pour les eaux usées, ce laboratoire est en mesure de réaliser l'analyse des 28 PFAS communiquées par la SPGE et qui correspond aux 28 PFAS à analyser selon l'arrêté du 20 juin 2023.

Il propose également l'analyse de l'Acide 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctane-1-sulfonique (4 HPOFS ou 6:2 FTS).

Pour les boues, il n'est pas en mesure d'analyser 5 PFAS sur les 28 communiquées par la SPGE. Il s'agit des substances suivantes :

- HFPO-DA (Gen X): Acide 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy) propanoïque,
- ADONA: Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque,
- 6:2 FTOH : 2-perfluorohexyl ethanol (6:2),
- 8:2 FTOH : 2-perfluorooctyle ethanol (8:2),
- C6O4 : Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid.

10.3.1.2 Le laboratoire CARSO-CAE

Ce laboratoire est également en mesure de réaliser l'analyse des PFAS dans les eaux usées et dans les boues.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** indique les PFAS analysées, avec ou sans accréditation COFRAC et selon la matrice eau ou boue, ainsi que la méthode analytique utilisée, avec les LQ et le coût associé.

Tableau 41 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire CARSO-CAE avec leur LQ et le coût analytique

Eau usée	COFRAC	Méthode	LQ (ng/L)	Coût (€)	Boue	COFRAC	Méthode	LQ (µg/kg)	Coût (€)
PFBA	OUI	HPLC/MS/MS par extraction liquide-liquide	100	150	PFBA	NON	HPLC/MS/MS après extraction ASE	10	200
PFBS			100		PFBS			10	
PFDA			100		PFDA			10	
PFDOD A			100		PFDOD A			10	
PFDOD S			100		PFDOD S			10	
PFDS			100		PFDS			10	
PFHpA			100		PFHpA			10	
PFHpS			100		PFHpS			10	
PFHxA			100		PFHxA			10	
PFHxS			100		PFHxS			10	
PFNA			100		PFNA			10	
PFNS			100		PFNS			10	
PFOA			100		PFOA			10	
PFOS			100		PFOS			10	
PFPEA			100		PFPEA			10	
PFPS		100	PFPS	10					

PFTRD A			100		PFTED A			10	
PFTRDS			100		PFTRD A			10	
PFUnA			100		PFTRD S			10	
PFUnDS			100		PFUnA			10	
PFTEDA	NON		100	150	PFUnD S			10	
PFHxD A			100						
PFODA			100						
HFPO- DA			100						
ADONA			100						
CC604		HPLC/MS/ MS par injection directe	100						
FTOH6 :2		GC/MS/MS par extraction liquide- liquide	100						
FTOH8 :2			100						

Il propose également l'analyse AOF dans la matrice eau, pour un supplément de 150 € par échantillon.

Pour ce laboratoire, le flaconnage nécessaire aux prélèvements est le suivant :

- Pour les eaux usées : trois flacons bruns de 250 mL en plastique,
- Pour les boues : un flacon de 1 L en plastique.

Les différents échantillons sont stockés au frais et à l'abri de la lumière en attendant leur envoi pour analyse. Leur transport est réalisé dans des glacières afin de respecter la chaîne du froid et conserver l'échantillon.

Le flaconnage ainsi que les glacières sont fournis par le laboratoire.

Ce laboratoire est en mesure d'analyser dans les eaux les 28 PFAS communiquée par la SPGE.

Pour les boues il n'est pas en mesure d'analyser 7 PFAS sur les 28 communiqués par la SPGE. Il s'agit des substances suivantes :

- PFHxDA : Acide perfluorohexadecanoïque
- PFODA : Acide perfluorooctadecanoïque

- HFPO-DA (Gen X): Acide 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy) propanoïque,
- ADONA: Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque,
- 6 :2 FTOH : 2-perfluorohexyl ethanol (6:2),
- 8 :2 FTOH : 2-perfluorooctyle ethanol (8:2),
- C6O4 : Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid.

10.3.1.3 Le laboratoire WESSLING

Ce laboratoire est en mesure de réaliser l'analyse des PFAS dans des eaux usées et dans des boues.

Pour les eaux usées, il propose le même catalogue d'analyse que les deux précédents laboratoires pour des coûts analytiques s'établissant à :

- Pour l'analyse des 20 PFAS de l'arrêté du 20 juin 2023 en accréditation : 160 euros,
- Pour l'analyse des 28 PFAS de l'arrêté du 20 juin 2023, dont seulement 20 en accréditation : 180 euros,
- Pour l'analyse AOF : 145 euros.

Pour les boues, ce laboratoire est en mesure de réaliser l'analyse de 26 PFAS (Tableau 42) pour un coût analytique de 190 euros.

Tableau 42 : Liste des 26 PFAS analysés dans les boues par le laboratoire WESSLING avec leur LQ

Substance	LQ (µg/Kg)
PFBA	0,1
PFPeA	0,03
PFBS	0,03
PFHxA	0,03
PFPeS	0,03
PFHpA	0,03
PFHxS	0,03
PFOA	0,03
PFHpS	0,03
PFNA	0,03
PFOS	0,03
PFNS	0,03
PFDA	0,03
PFDS	0,03
PFUnDA	0,03
PFUnDS	0,03
PFDoDA	0,03
PFDoDS	0,03
PFTTrDA	0,03
PFTTrDS	0,03
HFPO-DA /Gen X	0,03
DONA	0,03

PFTeDA	0,03
PFHxDA	0,03
PFODA	0.1
C6O4	0,5

En termes de flaconnage, ce laboratoire préconise :

Pour l'analyse des PFAS (les 20 ou 28) dans les eaux usées : un flacon de 100 mL en PE + un flacon de 15 mL rempli à 50 %,

Pour l'analyse de l'AOF dans les eaux usées : un flacon de 250 mL en PE,

Pour l'analyse des PFAS dans les boues le laboratoire préconise un flaconnage en PE, contenant une quantité minimum d'échantillon de 10 g de boue sèche.

Ce laboratoire est en mesure d'analyser dans les eaux usées les 28 PFAS communiquées par la SPGE.

Pour les boues, il n'est pas en mesure d'analyser un PFAS sur les 28. Il s'agit du : 2-perfluorooctyle ethanol (8:2 FTOH).

10.3.1.4 Le laboratoire QUALYSE

Ce laboratoire est en mesure de réaliser l'analyse des PFAS en interne mais uniquement sur des matrices d'eaux propres telles que eaux souterraines, des eaux de surfaces ou des eaux potables.

Cependant, il propose tout de même la réalisation de l'analyse des PFAS sur des eaux usées (mais pas sur les boues) via un sous-traitant. Il propose la même offre analytique que les deux laboratoires précédents soient :

- 20 PFAS avec accréditation COFRAC,
- 8 PFAS sans accréditation COFRAC,
- Indice AOF.

En termes de flaconnage, ce laboratoire préconise :

Pour le bilan des 20 PFAS : deux flacons bruns de 60 mL en plastique + un flacon de 500 mL en plastique,

Pour le bilan des 28 PFAS : deux flacons bruns de 60 mL en plastique + un flacon en verre brun de 100 mL (pour les composés volatils) + un flacon de 500 mL en plastique,

Pour l'AOF : un flacon de 1 L en plastique.

Le flaconnage est fourni par le laboratoire.

Une fois prélevés, les échantillons sont à déposer dans un des sites des laboratoires QUALYSE pour une prise en charge dans les 24 heures.

Les tarifs pratiqués par ce laboratoire sont les suivants :

- 20 PFAS (accrédités) + AOF pour un échantillon : 308 euros,
- 28 PFAS (20 accrédités sur les 28) + AOF pour un échantillon : 331 euros.

En plus des frais analytiques, ce laboratoire facture environ 45 euros de frais de sous-traitance comprenant la préparation et l'expédition des échantillons.

Ce laboratoire est en mesure d'analyser dans les eaux usées les 28 PFAS communiquées par la SPGE.

Les quatre laboratoires d'analyse consultés en France sont en mesure d'analyser dans les eaux usées 28 PFAS répondant à la réglementation régie par le décret du 20 juin 2023. Et de réaliser l'analyse de l'indice AOF.

L'analyse de ces PFAS est réalisée par les méthodes analytiques chromatographiques liquides ou gaz, couplées à un tandem de spectrométrie de masse.

Pour l'analyse des boues, l'offre analytique est dispersée. Sur les quatre laboratoires consultés, seul WESSLING-France est en mesure d'analyser 27 PFAS sur les 28 demandés. Les laboratoires IANESCO et CARSO-CEA peuvent analyser respectivement 23 et 19 PFAS sur les 28 demandés. Alors que le laboratoire QUALYSE ne propose pas l'analyse des PFAS dans cette matrice.

Le récapitulatif des coûts analytiques pratiqués par les laboratoires consultés en France est répertorié dans le Tableau 43. En moyenne, il faut compter 325 euros pour l'analyse des 28 PFAS et l'indice AOF dans les eaux usées et 190 euros pour l'analyse de 27 PFAS dans les boues.

Tableau 43 : Récapitulatif des coûts analytiques des quatre laboratoires consultés en France

Laboratoire	Coût en € pour 20 PFAS accrédité + AOF (Eau)	Coût en € pour 28 PFAS dont 20 accrédités + AOF (Eau)	Coût en € pour un nombre de PFAS analysables (Boue)
IANESCO	320	340	190 pour 24 PFAS
CARSO-CAE	300	300	200 pour 21 PFAS
WESSLING	305	325	190 pour 27 PFAS
QUALYSE	308	331	-

10.3.2 Les laboratoires d'analyse privés en Suisse

Les deux laboratoires d'analyse consultés en Suisse sont :

- Le laboratoire Eurofins sis 18 Avenue de Provence, 1007 Lausanne-Suisse,
- Le laboratoire Bachema sis Rütistrasse 22 CH-8952 Schlieren.

10.3.2.1 Le laboratoire Eurofins

Ce laboratoire est en mesure d'analyser 32 PFAS dans les eaux usées et les boues (Tableau 44). Il est certifié ISO 17025 par le service d'accréditation suisse (SAS).

Ces substances sont analysées par LC-MS/MS selon la Méthode normalisée allemande DIN 38407-42 pour l'analyse des eaux, des eaux usées et des boues.

Tableau 44 : Liste des PFAS analysés par Eurofins -Suisse avec leur LQ

	LQ eau [ng/L]	LQ sols [µg/kg]	CAS
PFBA	1	0.1	375-22-4
PFPeA	1	0.1	2706-90-3
PFHxA	1	0.1	307-24-4
PFHpA	1	0.1	375-85-9
PFOA	1	0.1	335-67-1

PFNA	1	0.1	375-95-1
PFDA	1	0.1	335-76-2
PFUnA	5	0.1	2058-94-8
PFDoDA	5	0.1	307-55-1
PFTTrA	5	0.5	72629-94-8
PFTA	5	0.1	376-06-7
PFBS	1	0.1	29420-49-3
PFPeS	1	0.1	630402-22-1
PFHxS	1	0.1	3871-99-6
PFHpS	1	0.1	375-92-8
PFOS	1	0.1	2795-39-3
PFNS	1	0.1	68259-12-1
PFDS	1	0.1	335-77-3
PFUnDS	5	0.5	749786-16-1
PFDoDS	5	0.5	79780-39-5
PFTTrS	10	1	791563-89-8
PFOSA	5	1	754-91-6
7H-PFHpA	10	1	1546-95-8
PFOA-diméthyl	10	1	172155-07-6
2H,2H-PFDA	10	1	27854-31-5
2H,2H,3H,3H-PFUnA	10	1	34598-33-9
1H,1H,2H,2H-PFHxS	5	0.5	757124-72-4
1H,1H,2H,2H-PFOS	10	1	27619-97-2
1H,1H,2H,2H-PFDS	5	0.5	39108-34-4
Capstone A	10	1	80475-32-7
Capstone B	500	50	34455-29-3
HFPO-DA ou GenX	5	0.1	13252-13-6

Ce laboratoire précise que les LQ sont susceptibles d'être relevées si des interférences dues à la matrice sont rencontrées.

Concernant les coûts analytiques, ce laboratoire estime le prix selon le nombre d'échantillons à analyser :

Pour les eaux usées, et la mesure de 28 PFAS il faut compter : 545 euros,

Pour les boues, et la mesure de 28 PFAS : 585 euros.

Ce laboratoire n'est pas en mesure d'analyser 7 PFAS sur les 28 communiquées par la SPGE. Il s'agit des substances suivantes :

- PFTeDA ou PFTeDA : Acide perfluorotetradecanoïque,
- PFHxDA : Acide perfluorohexadecanoïque,
- PFOA : Acide perfluorooctadecanoïque,
- 6:2 FTOH : 2-perfluorohexyl ethanol (6:2),
- 8:2 FTOH : 2-perfluorooctyle ethanol (8:2),
- ADONA: Acide 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque,
- C6O4 : Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid.

10.3.2.2 Le laboratoire Bachema

Ce laboratoire est en mesure de réaliser l'analyse de 35 PFAS, dans les eaux usées et les boues (Tableau 45). Il est accrédité ISO 17025 par le service d'accréditation Suisse (SAS). Les coûts analytiques varient selon le nombre de PFAS analysés et le pack proposé. Pour les boues une étape de préparation préalable est nécessaire. Celle-ci est facturée 50 CHF par échantillon (environ 52 euros).

Tableau 45 : Liste des PFAS analysés par le laboratoire Bachema avec leur LQ et les coûts par pack en CHF

Abréviation	Paramètre	Prix en Fr.				SQ µg/L
		(3 substances)	(9 substances)	(18 substances)	(30 substances)	
PFBA	Acide perfluorobutanoïque					0.001
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque					0.001
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque					0.001
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque					0.001
PFOA	Acide perfluorooctanoïque					0.001
PFNA	Acide perfluorononanoïque					0.001
PFDA	Acide perfluorodécanoïque					0.001
PFUnDA	Acide perfluoroundécanoïque					0.002
PFDoDA	Acide perfluorododécanoïque					0.002
PFTriDA	Acide perfluorotridécanoïque					0.002
PFTeDA	Acide perfluorotétradécanoïque					0.002
PFBS	Acide perfluorobutanesulfonique					0.001
PFPeS	Acide perfluoropentanesulfonique					0.001
PFHxS	Acide perfluorohexanesulfonique					0.001
PFHpS	Acide perfluoroheptanesulfonique					0.001
PFOS	Acide perfluorooctanesulfonique					0.001
PFNS	Acide perfluorononanesulfonique					0.002
PFDS	Acide perfluorodécanesulfonique					0.002
(P)FOSA	Perfluorooctanesulfonamide					0.001
MeFOSA	N-Méthylperfluorooctanesulfonamide					0.002
MeFOSAA	Acide N-méthylperfluorooctanesulfonamide					0.002
EtFOSA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamide					0.002
EtFOSAA	Acide N-éthylperfluorooctanesulfonamidoacétique					0.002
4:2-FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-hexanesulfonique					0.001
6:2-FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-octanesulfonique					0.001
8:2-FTS	Acide 1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-décanesulfonique					0.002
HFPO-DA (GenX)	Acide de 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propanoïque					0.01
DONA	Acide de 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoïque					0.01
9Cl-PF3ONS	Acide 9-chlorohexadecafluoro-3-oxanonane-1-sulfonique					0.002
8:2-FTUCA	Acide de 2H-Perfluoro-2-décenoïque					0.01

Concernant le flaconnage, ce laboratoire préconise :

- Pour les échantillons d'eau : deux tubes de 50 mL par échantillon en PP à centrifuger,
- Pour les boues, 50-100 g de matière sèche par échantillon. Ce dernier doit être : bien emballé, bien étiqueté et dans la mesure du possible stérilisé.

Ce laboratoire n'est pas en mesure d'analyser 5 PFAS sur les 28 communiqués par la SPGE. Il s'agit des substances suivantes :

- PFHxDA : Acide perfluorohexadécanoïque,

- PFOA : Acide perfluorooctadecanoïque,
- 6:2 FTOH : 2-perfluorohexyl ethanol (6:2),
- 8:2 FTOH : 2-perfluorooctyle ethanol (8:2),
- C6O4 : Perfluoro([5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy) acetic acid.

Les deux laboratoires consultés en Suisse sont en mesure de répondre à une demande partielle pour l'analyse des 28 PFAS communiqués par la SPGE. Eurofins Suisse et Bachema sont en mesure de réaliser l'analyse de 21 et 25 PFAS respectivement sur les 28 PFAS communiquées par la SPGE.

Les LQ dans ces deux laboratoires Suisses sont comprises entre 1 et 5 ng/L pour les eaux usées et entre 0,1 à 0,5 µg/kg de matière sèche pour les boues. Elles sont environ 10 fois plus basses qu'en France. Néanmoins Eurofins Suisse précise que ces LQ peuvent être revues à la hausse en cas d'effet de matrice avéré.

Les coûts analytiques en Suisse sont environ quatre fois plus élevés qu'en France. Il faut compter environ 600 euros en Suisse contre 150 euros en France pour un même nombre de substances dans les eaux usées. De plus les deux laboratoires consultés en Suisse ne sont pas en mesure d'assurer l'analyse AOF dans les eaux usées.

Les coûts analytiques sur la matrice Boue sont légèrement plus cher (+ 50 euros) que ce soit en Suisse ou en France car une étape supplémentaire à la préparation de l'échantillon est nécessaire.

10.4. Les laboratoires de recherche

10.4.1 Les laboratoires de recherche en France

Deux laboratoires de recherche situés dans la région Nouvelle Aquitaine ont été contactés :

- Le laboratoire E2Lim de l'université de Limoges,
- Le laboratoire IC2MP de l'université de Poitiers.

10.4.1.1 Le laboratoire E2Lim de l'université de Limoges

Ce laboratoire travaille sur le développement de méthodes analytiques pour le dosage des PFAS dans les eaux en vue du développement d'échantillonnage passif de ces substances. Les PFAS ciblés dans ce laboratoire sont les 20 PFAS de la directive EDCH 2020/2184.

Ces substances sont analysées par LC-MS/MS avec des LQ comprises entre 50 et 100 ng/L en fonction de la molécule analysée. Des étalons internes sont intégrés à la méthode analytique afin de corriger d'éventuels effets de matrices. La méthode développée ne concerne que l'eau potable.

En termes de bonnes pratiques, ce laboratoire recommande d'éviter tout contenant en verre sur lequel les PFAS à longue chaînes peuvent s'adsorber et de privilégier le PP ou le PE et cela sur toute la chaîne analytique. C'est-à-dire de l'échantillonnage jusqu'à l'analyse.

Il recommande également de conserver les échantillons systématiquement dans un mélange 50/50 (en volume) d'eau et de méthanol. Si l'analyse n'est prévue qu'après quelques jours, alors les échantillons sont conservés au congélateur à - 20°C.

10.4.1.2 *Le laboratoire IC2MP de l'université de Poitiers*

Ce laboratoire travaille également sur le développement analytique des PFAS ainsi que sur leurs traitements dans l'eau. Ils développent ces méthodes selon les référentiels des normes AFNOR et cela dans les différentes matrices d'eau (potable et usée) mais également sur la matrice boue. En termes de bonnes pratiques, il émet les mêmes recommandations que le laboratoire E2Lim.

Le fonctionnement d'un laboratoire d'analyse privé étant différent d'un laboratoire de recherche, ce dernier ne peut pas communiquer sur la liste exacte des PFAS analysées car certaines substances sont reliées à des projets de recherche confidentiels.

Les laboratoires de recherches en France développent leurs méthodes analytiques selon les référentiels des normes en vigueur. Les projets de recherches concernant les PFAS varient selon les axes de recherche développés dans chaque laboratoire. La communication sur des projets en cours ou futurs n'est pas automatique. En effet certains projets sont sous couvert de contrats de confidentialité.

10.4.2 *Les laboratoires de recherche en Suisse*

10.4.2.1 *L'Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau (EAWAG)*

L'EAWAG travaille sur différentes problématiques liées à l'eau. Actuellement, une équipe de chercheurs au sein de cet institut mène une étude dont l'objectif est de déterminer la présence de PFAS dans les stations d'épuration suisses, et de comparer les concentrations actuelles avec des mesures réalisées il y a plus de dix ans lors d'une étude menée en 2011 et dont les résultats ont été publiés en 2014 [106].

La publication des premiers résultats de l'étude en cours est prévue pour le dernier trimestre 2024.

Au sein de cet institut des méthodes analytiques sont développées pour la détection et la quantification d'une soixantaine de PFAS. Leur analyse est réalisable uniquement dans le cadre de projets de recherche, par conséquent l'institut ne réalise pas de prestations analytiques pour des externes.

En termes de bonnes pratiques, cet institut adopte les mêmes recommandations que les laboratoires cités précédemment.

ⁱ Remise en culture des sols agricoles