



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Rapport final

BRGM/RP-73924-FR

Version 1 du 21 janvier 2025

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

Cavelan A., Togola A.

Ce rapport a été vérifié le 04/02/2025 et approuvé le 16/02/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : PFAS, Diagnostic, AFFF, Pollution.

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

Cavelan A., Togola A. 2025. État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie. Rapport final V1. BRGM/RP-73924-FR, 63 p., 8 fig., 17 tab.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-08/04/2024

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Etat des lieux des travaux menés sur les sites d'utilisation des mousses AFFF	15
2.1. STRATEGIES ANALYTIQUES DEPLOYEES	16
2.2. FRANCE	17
2.2.1. Contexte et méthodologie	17
2.2.2. Principaux résultats.....	18
2.3. DANEMARK.....	19
2.3.1. Contexte et méthodologie	19
2.3.2. Principaux résultats.....	19
2.4. SUEDE.....	20
2.4.1. Contexte et méthodologie	20
2.4.2. Principaux résultats.....	21
2.5. FINLANDE	23
2.5.1. Contexte et méthodologie	23
2.5.2. Principaux résultats.....	23
2.6. NORVEGE	24
2.6.1. Contexte et méthodologie	24
2.6.2. Principaux résultats.....	26
2.7. PAYS BAS	27
2.7.1. Contexte et méthodologie	27
2.7.2. Principaux résultats.....	27
2.8. ESPAGNE.....	28
2.8.1. Contexte et méthodologie	28
2.8.2. Principaux résultats.....	28
2.9. AUSTRALIE	29
2.9.1. Contexte et méthodologie	29
2.9.2. Principaux résultats.....	29
2.10. ETATS UNIS D'AMÉRIQUE	30
2.10.1. Contexte et méthodologies	30
2.10.2. Principaux résultats.....	32
2.11. CANADA	33
2.11.1. Contexte et méthodologie	33
2.11.2. Principaux résultats.....	34
3. Synthèse des méthodologies de diagnostic des sites pollués par l'utilisation d'AFFF	35
3.1. COMPORTEMENT GENERAL DES PFAS	35
3.2. QUELLES SUBSTANCES RECHERCHER ?.....	39

3.3.	STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE.....	43
3.3.1.	Répartition des échantillons.....	43
3.3.2.	Prélèvements.....	44
3.3.3.	Précautions à prendre pour l'échantillonnage et le transport.....	46
3.	Conclusions.....	49
4.	Références.....	51

Liste des figures

Figure 1 : Evolution des teneurs en PFOS et PFOA dans les carottes de sol de différentes zones du site d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda avec la profondeur (traduit d'après Filipovic et al., 2015).....	22
Figure 2 : Distribution des PFAS dans différentes matrices échantillonnées sur deux sites d'utilisation d'AFFF finlandais (modifié et traduit depuis Reinikainen et al., SYKE 2019).....	24
Figure 3 : Evolution de la concentration en PFOS et de la somme des concentrations des 30-PFAS mesurés dans le sol (cette somme comprend le PFBS, PFHxS, PFHpS, le PFOS, le PFDeS, le PFBA, le PFPeA, le PFHxA, PFHpA, le PFOA, le PFNA, le PFDeA, le PFUnA, PFDoA, PFTTrDA, PFTeDA, le PFHxDA, FOSA, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, le 7H-Dodecafluoroheptanoic acid, le Perfluoro-3,7-dimethyl acid (PF-3,7-DMOA), l'EtFOSA, EtFOSAA, EtFOSA, MeFOSAA, MeFOSE, MeFOSA, FOSAA) d'une colonne pour des expériences avec de faibles (a) taux d'infiltration faible (a) et élevée (b) (traduit d'après Høisæter et al., 2019).....	26
Figure 4 : Schéma conceptuel montrant les principales voies de transfert et le comportement général des PFAS identifiés sur les sites d'utilisation d'AFFF.....	36
Figure 5 : Evolution des teneurs de trois PFAS de différentes longueurs de chaîne carbonée dans des carottes de sol prélevées sur un site impacté par l'utilisation d'AFFF (traduit d'après Bigler et al., 2024).....	37
Figure 6 : Substances poly et perfluorées majoritairement rencontrées dans les émulseurs (BRGM, 2024a; Liu et al., 2022), leurs produits de dégradations (BRGM, 2024a, 2024b; Gonda et al., 2023; Yan et al., 2024) et sur les sites d'utilisation des AFFF (ce rapport).....	39
Figure 7 : Fréquence de quantification en fonction de la fréquence de recherche des PFAS dans les A) sols et sédiments et B) les eaux de surface et souterraines des sites AFFF. Les PFAS inclus dans chaque groupe sont précisés dans le Tableau 14 pour chacun des milieux.....	42
Figure 8 : Exemple de stratégie d'échantillonnage A) aléatoire au sein de secteurs prédécoupés, B) systématique/régulier.....	43

Liste des tableaux

Tab. 1 : Classes majeures des PFAS rencontrés dans la composition des AFFF (d'après BRGM, 2024a).....	12
Tab. 2 : Caractéristiques des sites et matrices environnementales échantillonnées (en gris) lors d'études portant sur la caractérisation de la pollution de sites d'utilisation d'AFFF.....	15
Tab. 3 : Stratégie appliquée à l'étude d'un site d'entraînement des pompiers français (Dauchy et al., 2019b, 2019a).....	18
Tab : 4 : Stratégie appliquée à l'étude du centre d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda et d'un aéroport militaire suédois (Ahrens et al., 2015; Filipovic et al., 2015).....	21
Tab. 5 : Teneurs maximales règlementées au niveau européen pour le PFAS applicables depuis le 1er janvier 2023 pour les aliments considérés comme plus à risque (valeurs exprimées en µg/kg de poids frais, d'après le règlement UE 2022/2388).....	22
Tab. 6 : Stratégie appliquée à l'étude de quatre sites d'utilisation d'AFFF en Finlande (Reinikainen et al., 2022, 2019).....	23
Tab. 7 : Les six PFAS les plus abondants mesurés dans chaque matrice sur quatre sites d'entraînement à la lutte contre les incendies finlandais.....	23

Tab. 8 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologies appliquées à l'étude de différents sites d'utilisation d'AFFF en Norvège (AVINOR, 2012a, 2012b; Høisæter et al., 2019; Kärroman et al., 2011; SFT, 2008).....	25
Tab. 9 : Stratégie appliquée à l'étude de l'aéroport de Schiphol d'Amsterdam, au Pays Bas (Kwadijk et al., 2014).....	27
Tab. 10 : Stratégie appliquée à un site d'entraînement à la lutte contre les incendies en Espagne (PROMISCES, López de Alda, 2023).....	28
Tab. 11 : Stratégie appliquée à l'étude d'un centre d'entraînement à la lutte contre les incendies d'un terrain d'aviation militaire australien (Bräunig et al., 2017).....	29
Tab. 12 : Stratégie appliquée à l'étude de plusieurs zones d'entraînement à la lutte contre les incendies aux États Unis (Adamson et al., 2022; Anderson et al., 2016; Houtz et al., 2013; Nickerson et al., 2020).....	31
Tab. 13 : Stratégie appliquée à l'étude de plusieurs zones d'entraînement à la lutte contre les incendies d'aéroports civils canadiens (Liu et al., 2021).....	33
Tab. 14 : Nombre total d'échantillons analysés et concentration totale en PFAS mesurée dans les 20 études présentées.....	35
Tab. 15 : Fréquences auxquelles les PFAS ont été recherchés (R) et quantifiés (Q) dans les différentes matrices des sites AFFF parmi les 23 publications étudiées. Les groupes (Grp.) indiqués pour chaque milieu correspondent aux groupes de la figure 7.	40
Tab. 16 : Caractéristiques des émulseurs contenant des PFAS utilisés en France entre 2012 et aujourd'hui identifiés à l'heure actuelle (informations communiquées par les principaux fournisseurs).....	42
Tab. 17 : Recommandations à suivre pour éviter tous types de contaminations croisées lors de l'échantillonnage, du transport, de l'analyse et une bonne conservation des échantillons.....	46

Sigles & abréviations

AFFF :	Agent Formant un Film Flottant
ANSES :	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
DNV :	Fondation indépendante norvégienne Det Norske Veritas
DPT :	Technologie de forage à poussée directe (DPT)
ETFE :	Ethylène tétrafluoroéthylène
FEP :	Fluoroéthylène propylène
FFF :	<i>Fluorine-Free Foam</i> ou mousses anti-incendie sans fluor
LC-MS/MS :	Chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse en tandem.
LC-HRMS :	Chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse haute résolution
MTEBFMP :	Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche
MTM :	L'École des sciences et de la technologie de l'Université d'Orebro
PFAS :	Substances poly et perfluorées
PFCAs :	Acides carboxyliques perfluorés
PFOA :	Acide perfluorooctanoïque
PFOS :	Acide perfluorooctane sulfonique
PFSAs :	Acides sulfoniques perfluorés
PE :	Polyéthylène
PEBD :	Polyéthylène basse densité
PEHD :	Polyéthylène haute densité
PP :	Polypropylène
PTFE :	Polytétrafluoroéthylène (Téflon)
SFT :	Autorités norvégiennes de contrôle de la pollution
SLU :	Université suédoise des sciences agricoles
SPE :	Extraction en phase solide
STEP :	Station d'épuration des eaux usées
SYKE :	Institut finlandais de l'environnement
TOP :	Dosage des précurseurs oxydables totaux
UPLC :	Chromatographie liquide à ultra haute performance

Contexte

Dans le cadre du plan d'actions interministériel sur les substances poly et perfluorées (PFAS) (en date d'avril 2024) visant, notamment, à améliorer la connaissance sur les méthodes de mesures, la surveillance et à informer pour mieux agir, le Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTEBFMP) a demandé au BRGM de mener une réflexion sur l'élaboration d'un cadre méthodologique pour la mise en œuvre d'investigations sur les sites potentiellement pollués aux PFAS en raison de l'utilisation de mousses anti-incendie, notamment sur les milieux sols et eaux souterraines.

Les sites sur lesquels des mousses anti-incendie contenant des PFAS ont été utilisées sont variés dès lors que des matières et liquides inflammables sont stockés, produits et/ou utilisés à l'échelle industrielle : sites Seveso seuil haut stockant des liquides inflammables, aéroports et aérodromes civils et militaires, casernes de pompier, sites d'entraînement ou de formation à la lutte contre les feux d'hydrocarbures ou de solvants. Sur la base d'une étude bibliographique, ce travail doit permettre de faire la synthèse des recommandations et méthodologies existantes sur les sites d'essais/d'entraînement à la lutte contre les incendies concernant les milieux investigués, les paramètres étudiés, ou encore les techniques et méthodes de prélèvement utilisées pour la réalisation du diagnostic.

Cette synthèse doit servir de base à de futures réflexions et à l'élaboration des programmes d'investigations visant à caractériser les sources potentielles de pollution et à évaluer leurs impacts sur les eaux souterraines des sites utilisateurs ou ayant utilisé des mousses anti-incendie lors d'essais et d'entraînement. Cette étude n'inclut donc pas les sites sur lesquels des mousses anti-incendie ont été utilisées lors d'intervention d'urgence (en réponse à un sinistre).

1. Introduction

De nombreux émulseurs conçus pour lutter contre les incendies de combustibles inflammables de type B (feux d'hydrocarbures) contiennent des substances poly et perfluorées (PFAS) afin d'augmenter leur capacité d'extinction. C'est le cas des émulseurs de type B appelés « Agent filmogène aqueux » ou AFFF. Etant directement déversés dans l'environnement lors de leur utilisation, l'utilisation de ces AFFF a pu conduire à une pollution à long terme des sols et des systèmes aquatiques.

Différentes formulations d'AFFF ont été utilisées pour les entraînements, la formation, les essais de performance et de maintenance du matériel de lutte contre les incendies sur de nombreux sites qui pourraient aujourd'hui faire l'objet de pollutions par les PFAS. Citons :

- les aéroports et aérodromes civils et militaires ;
- les installations militaires ;
- les services d'incendie des collectivités locales ;
- les raffineries, installations de stockage de pétrole (sociétés gazières, pétrolières, raffineries, stockages de produits pétroliers) et les usines de fabrication de produits chimiques (ex : Seveso seuil haut stockant des liquides inflammables).

Si pour une même période, la composition des émulseurs a évolué en fonction des producteurs, elle a aussi largement varié au cours des 50 dernières années avec l'évolution de la réglementation. Même si la nature des PFAS utilisés dans les AFFF n'est que très rarement détaillée par les fabricants, l'analyse de certains émulseurs montre qu'avant les années 2000s les émulseurs sur le marché se composent majoritairement d'acides sulfoniques (PFSA, ex: PFOS) et carboxyliques poly et perfluorés (PFCAs, ex: PFOA) à chaînes longues ($\geq C_8$, BRGM, 2024a). Suite à l'interdiction de produire et d'utiliser le PFOS en 2011 en Europe ([règlement 757/2010](#)), aux restrictions d'utilisation du PFOA en 2020 ([règlement 2017-1000](#)), et aux restrictions d'usage des C_9-C_{14} PFCAs ([règlement EU 2021/1297](#)), les PFAS à chaînes longues ont été progressivement remplacés dans les émulseurs par des PFAS à chaînes courtes ($\leq C_6$, ex : PFHxS, PFHxA) et des précurseurs polyfluorés (Fluorotélomères, ex : 6:2 FTSA, 6:2 FTAB). Cependant, en raison de la difficulté de trouver des substituts aux PFAS dans les AFFF ayant la même efficacité d'extinction, des dérogations autorisent toujours l'utilisation de PFOA, du C_9-C_{14} PFCAs dans les AFFF jusqu'en juillet 2025, à condition que ces émulseurs ne soient pas utilisés pour la formation, pour les essais et sur les sites où les rejets ne sont pas contenus ([règlement 2020/784](#)). Des stocks d'anciennes formulations d'émulseurs contenant des C_8 , C_9-C_{14} PFCAs sont donc possiblement encore utilisés en Europe malgré les restrictions d'usage et de production. Depuis, d'autres réglementations sont venues restreindre l'utilisation de PFAS à chaînes courtes comme le PFHxS ([EU 2023/1608](#)) depuis août 2023 et plus récemment le PFHxA ([EU 2024/2462](#)) à partir d'avril 2026. Il est donc probable que la composition des AFFF encore sur le marché subissent de nouvelles modifications. A noter que depuis 2018, des émulseurs sans PFAS (les FFF ou *Fluorine-Free Foam*) sont utilisés sur de nombreux sites français.

Tab. 1 : Classes majeures des PFAS rencontrés dans la composition des AFFF (d'après BRGM, 2024a).

Classes	Abréviations	Structure	Substances les plus courantes
Acides carboxyliques poly et perfluorés	PFCA		PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoA, PFTTrDA, PFTeDA
Acides sulfoniques poly et perfluorés	PFSA		PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS
Fluorotélomères sulfonates	FTS ou FTSA		4:2, 6:2 et 8:2 FTS
Fluorotélomères sulfonamides alkylbétaïnes	FTAB ou FTSAB		6:2, 8:2 et 10:2 FTAB
Perfluoroalcanes sulfonamides	FASA ou PFASA		FOSA, MeFOSA, EtFOSA
Perfluoroalcanes sulfonamides acétiques	FASAA		FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA
Perfluoroalcanes sulfonamides éthanol	FASE		FOSE, EtFOSE, MeFOSE
Fluorotélomères bêtaïnes	FTB		5:3, 5:1:2, 7:3, 7:1:2, 9:3, 9:1:2 FTB
Fluorotélomères d'acides carboxyliques	FTCA		6:2 et 5:3 FTCA ou (5:3 acid)
Fluorotélomères sulfonamides amides	FTA ou FTSaAm ou FTAA		6:2 FTSaAm
Fluorotélomères thioether amido sulfonates	FTSAS ou FtTAoS		6:2 FtTAoS
Fluorotélomères thio hydroxy ammonium	FtTHN+		6:2 FtTHN+
Perfluoroalcanes sulfonamides amines	PFSaAm ou PFSAm ou AmPr-FASAs		PFHxSAm, PFOSAm, TAmPr-FHxSA
Acides perfluoroalcanes sulfonamido amino carboxylates	PFSaAmA ou PFSaAmA ou Cet-AmPr-FASAs		PFHxSAmA
Perfluoroalcanes sulfonamides Ammonio propyl (+ formes méthyles, et triméthyles)	AmPr-FASA-PrA		AmPr-FHxSA-PrA, TAmPr-FHxSA-PrA, CetAmPr-FOSA-PrA, CetAmPr-FHsSA-PrA
Fluorotélomères sulfonamides amines oxides	FTNO		6:2 FTNO

La grande diversité des formulations d'AFFF ayant pu être utilisées sur un même site au cours de son activité peut grandement compliquer la caractérisation de la signature chimique de la pollution. Le Tableau 1 résume les principales classes de PFAS identifiées à ce jour dans la composition des AFFF. Plus d'information sur les substances associées aux mousses AFFF sont

disponibles dans le rapport suivant : BRGM/RP-73431-FR, BRGM, 2024a. Attention, étant à ce jour il est difficile d'identifier et de discriminer les PFAS pouvant avoir été émis par d'autres sources d'émission que les AFFF sur les sites, certains PFAS retrouvés sur les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies pourraient venir d'autres sources que les AFFF. Par exemple, il semblerait que des PFAS retrouvés sur les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies de certains aéroports (ex PFECHS) puissent provenir de l'utilisation de fluides hydrauliques (De Silva et al., 2011; Wang et al., 2016). D'autre part, le comportement de ces substances dans l'environnement n'est, à ce jour, par encore bien compris. Afin d'y voir plus clair, ce travail a pour objectif de faire un état des lieux des recommandations et des méthodologies existantes pour le diagnostic des sites d'essais/d'entraînement à la lutte contre les incendies utilisant ou ayant utilisé des mousses anti-incendie contenant des PFAS de type AFFF. L'objectif de ce rapport est notamment d'identifier les stratégies de surveillance : les milieux généralement investigués, les substances et paramètres recherchés et les performances analytiques associées, les techniques et méthodes de prélèvement utilisées afin d'aider à l'élaboration des futurs programmes d'investigations visant à caractériser les sources potentielles de pollution aux PFAS sur ces sites.

2. Etat des lieux des travaux menés sur les sites d'utilisation des mousses AFFF

Ce rapport présente une vingtaine d'études menées sur différents sites d'entraînement à la lutte contre les incendies où des mousses AFFF ont été utilisées à travers le monde. Ces études concernent majoritairement des sites d'entraînement à la lutte contre les incendies d'aéroports civils ou militaires. Ces études, résumées dans le Tableau 2, sont détaillées dans la suite de ce chapitre.

Tab. 2 : Caractéristiques des sites et matrices environnementales échantillonnées (en gris) lors d'études portant sur la caractérisation de la pollution de sites d'utilisation d'AFFF.

Références	Pays	Sites	Période d'activité	Emulseurs utilisés (si connus)	Matrices échantillonnées			
					Eau de surface	Eau souterraine	Sédiment	Sol
(Reinikainen et al., 2022, 2019)	Finlande	Formation à la lutte contre les incendies, pompiers.	1992 à 2000s	Tovalex® green	x		x	
		Entraînement à la lutte contre les incendies, aéroport.	1974 à 2012		x			x
		Entraînement à la lutte contre les incendies, aéroport.	1983 à 2012	Sthamex®-AFFF 3%	x	x		x
		Entraînement à la lutte contre les incendies, raffinerie de pétrole + incendie.	1980s à 2015		x			
(Dauchy et al., 2019b, 2019a)	France	Entraînement à la lutte contre les incendies, pompiers (ancienne raffinerie)	1969-auj		x		x	
(PROMISCES and López de Alda, 2023)	Espagne	Formation à la lutte contre les incendies	1990s-auj		x		x	
(Miljøministeriet, 2014)	Danemark	Entraînement à la lutte contre les incendies, pompiers				x		
		Entraînement à la lutte contre les incendies, aéroport.				x		
		Entraînement à la lutte contre les incendies, raffinerie de pétrole				x		
		Entraînement à la lutte contre les incendies, base militaire				x		
(SFT, 2008)	Norvège	Entraînement à la lutte contre les incendies, raffinerie de pétrole.	1988-2006	National foam, 3M				x
		Entraînement à la lutte contre les incendies, industrie chimique.	1982-2001	licence 3M, ARCTIC FOAM	x		x	x
		Entraînement à la lutte contre les incendies, site militaire.	1980-2000 (ancien) et depuis 2000 (nouveau)				x	x
		Entraînement à la lutte contre les incendies, aéroport civil.	1990-2002			x		x
(AVINOR, 2012a, 2012b)	Norvège	Entraînement à la lutte contre les incendies, 45 Aéroports civils.	1968-auj		x	x	x	
(Høisæter et al., 2019)	Norvège	Entraînement à la lutte contre les incendies, Aéroport	Depuis 1989		x		x	
(Kårman et al., 2011)	Norvège	Installations d'entraînement à la lutte contre les incendies, Aéroport				x	x	
(Ahrens et al., 2015)	Suède	Installations d'entraînement à la lutte contre les incendies, Aéroport	Jusqu'en 2011	Sthamex®-AFFF 3%, Presto® AFFF et Moussol®APS-P	x		x	
(Filipovic et al., 2015)	Suède	Installations d'entraînement à la lutte contre les incendies, zone de stockage, zone d'intervention d'urgence, Aéroport militaire	1946 à 1986		x	x		x
(Rosenqvist, 2020)	Suède	Sites d'utilisation de mousses anti-incendie				x		
(Kwadijk et al., 2014)	Pays-Bas	Fuite accidentelle d'AFFF, Aéroport.	2008		x		x	
(Bigler et al., 2024)	USA	Entraînement à la lutte contre les incendies, site militaire.	De 1968 – 1990s					x
(Anderson et al., 2016)	USA	Zones d'intervention d'urgence, sites militaires			x	x	x	x
		Zones de stockage, sites militaire	1970s à 1990s		x	x	x	x
		Zones d'essais et maintenance, sites militaires			x	x	x	x

(Nickerson et al., 2020)	USA	Formation à la lutte contre les incendies, site militaire (dépollué en 1994)	1968 à 1991		x		x
(Houtz et al., 2013)	USA	Formation à la lutte contre les incendies, base aérienne militaire	1942-1990	3M, National Foam, Ansul AFFF probables	x		x
(Adamson et al., 2022, 2020)	USA	Formation à la lutte contre les incendies, site militaire	1950s à 2000s		x		x
		Zone de stockage et de transfert d'AFFF, site d'activités de lutte contre les incendies et situations d'urgence			x		x
(Bräunig et al., 2017)	Australie	Installation d'entraînement à la lutte contre les incendies sur un terrain d'aviation militaire	1970s à Auj.	3M Light Water, ANSUL Ansulite®	x	x	x
(Liu et al., 2021)	Canada	Formation à la lutte contre les incendies, 4 aéroports.	De 1975 à Auj.		x		x

2.1. STRATEGIES ANALYTIQUES DEPLOYEES

Les travaux présentés par la suite reflètent des résultats obtenus dans différents contextes d'études : surveillance ou projets de recherche. De ce fait, les techniques et méthodes analytiques mises en œuvre sont parfois très prospectives, parfois encore en développement et disponibles dans les laboratoires de recherche et non pour des analyses de routine. Le chapitre suivant apporte un éclairage sur les informations portées par ces différentes approches.

Les analyses ciblées permettent de quantifier les molécules dans les diverses matrices à partir d'une liste de composés d'intérêt pour lesquels les méthodes sont développées et validées.

Ces méthodes nécessitent l'utilisation de standards analytiques, permettant de vérifier l'adéquation de la méthode, de qualifier ses performances et par la suite de donner une concentration par composé dans les échantillons. Il existe des centaines de méthodes différentes, développées indépendamment par chaque laboratoire ou s'appuyant sur les méthodes normalisées, couvrant un périmètre de molécules plus ou moins grand, selon les besoins, les choix des laboratoires ou les spécificités des molécules à analyser. Par exemple, certaines molécules, comme les PFAS ultra-courts (dont le TFA), ont des spécificités chimiques (forte hydrophilie, forte polarité) qui ne permettent pas de les inclure dans des méthodes à large spectre, telles que certaines méthodes couvrant actuellement jusqu'à 80 PFAS différents. Pour les PFAS les principales méthodes d'analyses ciblées utilisent la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (*LC-MS/MS*). *D'autres méthodes utilisent* la chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem (ex : pour les PFAS volatils).

Le test TOP ou TOP assay (Analyse des Précurseurs oxydables totaux) repose aussi sur une méthode d'analyse ciblée. Pour pallier la méconnaissance sur un grand nombre de PFAS, le principe est de dégrader l'échantillon par oxydation, afin de former les produits terminaux majoritairement connus PFCAs et PFSA (ITRC, 2024) de différentes longueurs de chaînes fluorocarbonées et ainsi simplifier l'étape d'analyse. Les étapes d'oxydation ne sont pas encore totalement robustes ni harmonisées, notamment pour les matrices complexes. Il peut rester nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes ciblées pour couvrir l'intégralité des composés formés après oxydation.

Cette analyse donne une image simplifiée de la pollution en PFAS, permettant d'en déduire une typologie des précurseurs initiaux par l'étude de la longueur des chaînes fluorocarbonées retrouvées. Il n'est cependant pas possible d'identifier de façon précise ces précurseurs. Par ailleurs, certains PFAS, non oxydables, ne seront pas mis en évidence par cette méthode.

L'analyse non ciblée (screening) permet d'acquérir sans a priori l'empreinte de toutes les molécules analysables par la méthode choisie. Celles-ci vont former des signaux, caractérisés par un temps de rétention et des masses, correspondant soit à la molécule originelle soit à celles

de partie de la molécule se fragmentant lors de l'analyse. Chaque molécule aura ainsi un signal spécifique. Par comparaison à des bases de données d'empreinte (suspect screening, recherche de suspects par étude spécifique de chaque fragment (*unknown screening*, élucidation d'inconnus)), il est possible d'identifier les différents signaux présents dans l'échantillon. Il peut y avoir plusieurs dizaines de milliers de signaux par échantillon, l'identification individuelle est donc fastidieuse voire impossible.

C'est une méthode qualitative (permettant principalement de révéler la présence d'une substance) utilisant les technologies de spectrométrie de masse haute résolution (HRMS), principalement couplée à la chromatographie liquide (LC-HRMS) même si des travaux existent utilisant la chromatographie gazeuse.

La confirmation absolue de l'identification nécessite la comparaison à un standard analytique. Quand celui-ci est disponible, des méthodes semi-quantitatives ou quantitatives peuvent alors être déployées.

Ces trois approches sont les principales approches appliquées à la problématique des mousses anti-incendie, très souvent de manière combinée afin d'accroître de façon itérative les informations acquises dans les différents contextes.

2.2. FRANCE

2.2.1. Contexte et méthodologie

Le laboratoire d'Hydrologie de Nancy de l'ANSES a publié deux études en 2019 (Dauchy et al., 2019b, 2019a). La première vise à cartographier la distribution des PFAS dans les sols et les eaux souterraines d'un site d'entraînement des pompiers où des mousses AFFF ont été utilisées de manière intensive. La seconde vise à évaluer la charge en PFAS drainée depuis les sols de surface de ce même site et retrouvée dans les eaux usées et les eaux de ruissellement. Le site étudié est une raffinerie de pétrole équipée d'une zone d'entraînement à la lutte contre les incendies depuis 1969 et servant de zone d'entraînement pour les pompiers depuis 1987.

Afin de définir les substances à rechercher sur le site, 122 PFAS déjà identifiés au moins une fois dans des émulseurs ont été recherchés dans les échantillons de concentrés d'émulseurs et une des carottes de sol récupérées sur le site (Dauchy et al., 2017). A l'issue de cette étude, 33 PFAS ont été sélectionnés pour une analyse quantitative d'échantillons du site, les autres substances étant suivies par analyse qualitative (cf. Tableau 3).

Une analyse des précurseurs oxydables totaux (*TOP assay*) a également été réalisée après une première analyse pour caractériser la présence éventuelle de précurseurs ne faisant pas partie de la liste des 33 PFAS quantifiés. La méthodologie utilisée est résumée en Tableau 3.

Tab. 3 : Stratégie appliquée à l'étude d'un site d'entraînement des pompiers français (Dauchy et al., 2019b, 2019a).

Dauchy et al., 2019b			
Matrices échantillonnées	Eaux de surface	Eaux souterraines	Sols
Substances ciblées	33 PFAS quantifiés : C ₄ , C ₆ -C ₈ , C ₁₀ PFSAs, les C ₄ -C ₁₄ PFCAs, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, le FOSA, le MeFOSA, l'EtFOSA, le FOSAA, le MeFOSAA, l'EtFOSAA, les 5:3, 6:2, 8:2, 10:2 FTCAs, les 6:2, 8:2, 10:2 FTUCAs, le 6:2 FTAB et le 6:2 FTA. 25 PFAS recherchés et non quantifiés : PFHxSAmA, PFHxSAm, PFOSAm, 5:1:2, 7:1:2, 9:1:2, 5:3, 7:3, 9:3 FTB, 6:2 FtTAoS, 6:2, 8:2 FtTAoS-SO, 6:2, 8:2 FtTHN+, 6:2, 8:2 FtTHN+-SO, 8:2, 10:2 FTAB, 8:2 FTA, 6:2 FtSa, FHxSA, PFPeS, PFNS, Cl-PFOS.		
TOP assay	Recherches de précurseurs éventuels non identifiés		
Stratégie d'échantillonnage	4 sources à proximité du site		
Méthodes de prélèvement	Non communiquée	13 piézomètres répartis sur tout le site.	30 carottes de sol de 2 à 4 m de profondeur réparties sur tout le site + 14 carottes de 4 à 15 m prélevées dans les zones d'intérêt. Echantillons composites de sol (sur un intervalle de profondeur de 25 à 100 cm)
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide (ISO/DIS 25101 :2009)	Non communiquée	Lyophilisation, extraction au méthanol
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS avant et après TOP		HPLC-MS/MS avant et après TOP
Limites de quantification	4 à 25 ng/L		< 2 µg/kg
Dauchy et al., 2019a			
Matrices échantillonnées	Eaux de surface		
Substances ciblées	31 PFAS quantifiés : C ₃ -C ₁₃ PFCAs, C ₄ , C ₆ -C ₈ , C ₁₀ PFSAs, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, 5:3, 6:2, 8:2, 10:2 FTCAs, 6:2, 8:2, 10:2 FTUCAs, FOSA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, 6:2 FTAB, 6:2 FTA. 25 PFAS recherchés et non quantifiés : 6:2 FtTAoS, 6:2 et 8:2 FtTAoS-SO, 8:2, 10:2 FTAB, 6:2 FtSaMAm, 6:2 FtSa, 4:2, 6:2, 8:2 FTA, 5:3, 7:3, 9:3, 5:1:2, 7:1:2, 9:1:2 FTB, 6:2, 8:2 FtTHN+, 6:2, 8:2 FtTHN+-SO, PFHxSAmA, PFOSAm, PFHxSAm, FHxSA, PFNS et le PFPeS.		
Stratégie d'échantillonnage	43 échantillons collectés à partir de différents systèmes : 7 d'effluents de la STEP, 22 d'eaux de ruissellement, 6 eaux de lagunage, et 4 eaux utilisées pour la dilution des concentrés de mousse.		
Méthodes de prélèvement	Prélèvement dans des bouteilles en PEHD, conservés à 4°C avant analyse.		
Préparation des échantillons	Non communiquées		
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS		
Limites de quantification	4 à 25 ng/L		

HPLC-MS/MS : Chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) couplée à la Spectrométrie de Masse (MS) en tandem.

2.2.2. Principaux résultats

L'étude révèle que les PFAS les plus abondants dans les émulseurs utilisés sur le site sont : le C₄, C₆, C₇, C₈, C₁₀ PFSAs, les C₄ à C₁₄ PFCAs, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, le FOSA, le MeFOSA, l'EtFOSA, le FOSAA, le MeFOSAA, l'EtFOSAA, les 5:3, 6:2, 8:2, 10:2 FTCAs, les 6:2, 8:2, 10:2 FTUCAs, le 6:2 FTAB et le 6:2 FTSaAm (Dauchy et al., 2017). L'utilisation de ces AFFF sur le site depuis plus de 50 ans a entraîné un marquage significatif **de la zone non saturée au droit du site**. La somme des 33 PFAS quantifiés ($\sum_{33} \text{PFAS}$) atteint jusqu'à 357 mg/kg dans les sols et sert de réservoir de PFAS pour les eaux souterraines où la $\sum_{33} \text{PFAS}$ atteint jusqu'à 8300 ng/L en aval du site (Dauchy et al., 2019b).

La comparaison des résultats d'analyses avant et après TOP montrent que **45 à 72% des PFAS présents dans les eaux souterraines et qui n'ont pas pu être identifiés** sont capables de générer des PFCAs et PFSAs lors de leur dégradation dans l'environnement. Ainsi, les **concentrations mesurées en PFAS connus sur le site sont probablement sous-estimées**. De plus, ces études montrent que le profil de composition des PFAS identifiés dans les eaux souterraines varie fortement d'un piézomètre à l'autre. Cela suggère que des paramètres non mesurés dans ces études ont pu affecter la distribution des PFAS sur le site comme :

- la quantité, la fréquence d'utilisation, la composition et la dégradation d'émulseurs déversés sur le site ;
- les conditions météorologiques (pluies, vent, sécheresses) au moment de l'utilisation des AFFF ;
- la nature du sol (teneur en matière organique, en argile, pouvant affecter les conditions de transfert des PFAS après leur déversement) ;
- la présence de surfactants hydrocarbonés, de solvants ou de carburants libérés conjointement aux PFAS lors des exercices d'entraînement pouvant impacter le transport des PFAS (Guelfo and Higgins, 2013).

La comparaison des classes de PFAS analysées dans les eaux de ruissellement, de lagunage et les eaux usées a montré une très forte contribution des fluorotélomères à la pollution du site (plus de 86% de la \sum_{33} -PFAS atteignant jusqu'à 121 mg/L dans les eaux usées provenant des zones d'entraînement à la lutte contre l'incendie, Dauchy et al., 2019a). **Les émissions de PFAS provenant de l'utilisation des AFFF ne peuvent donc pas être surveillées uniquement par le suivi des PFCAs et PFSAs.** Une recherche complémentaire a été effectuée sur les eaux usées du site afin de rechercher les substances identifiées dans la composition de certains AFFF. Cette recherche a permis d'identifier la présence de nombreux autres composés, tels que les : 6:2 FtTAoS, 6:2 et 8:2 FtTAoS-SO, 8:2, 10:2 FTAB, 6:2 FtSaMAM, 6:2 FTSA, 4:2, 6:2, 8:2 FTA, 5:3, 7:3, 9:3, 5:1:2, 7:1:2, 9:1:2 FTB, 6:2, 8:2 FtTHN+, 6:2, 8:2 FtTHN+-SO, PFHxSAmA, PFOSAm, PFHxSAm, FHxSA, PFNS et le PFPeS (Dauchy et al., 2019a). Ces substances n'ont néanmoins pas pu être quantifiées ni dans les milieux (sol, eaux souterraines, ni dans les eaux de ruissellement, de lagunage et les eaux usées) en raison d'une absence de standards analytiques. La présence de ces substances n'est donc pas prise en compte dans les teneurs en PFAS mesurées et présentées dans ces deux études, qui sont, de ce fait, largement sous-estimées.

Sur la base des concentrations en PFAS mesurées, la masse de PFAS rejetée dans la rivière (via les effluents de la STEP) et dans le lagon a été estimée respectivement à 387 ± 183 kg et 56 ± 15 kg par an en moyenne (Dauchy et al., 2019a). Ces sites contribuent donc également à une **pollution des eaux de surface** par les PFAS.

2.3. DANEMARK

2.3.1. Contexte et méthodologie

En 2013, l'Agence danoise de protection de l'environnement a lancé un projet visant à étudier l'impact de différentes sources ponctuelles d'émission en PFAS sur la pollution des eaux souterraines, dont l'utilisation d'AFFF (Miljøministeriet, 2014). Huit sites ont été investigués incluant des casernes ou des sites d'entraînements des pompiers, des raffineries, des bases militaires et des aéroports civils. Les sites ont été choisis sur la base des données hydrogéologiques disponibles et des quantités de mousses utilisées. Sur ces sites, neuf PFAS ont été suivis dans les eaux souterraines. Cela inclut le PFBS, le PFHpA et le PFHxA auxquels s'ajoute le suivi de tous les composés mentionnés dans la réglementation danoise pour les mesures environnementales par le décret n° 900 du 17/08/2011 : le C₈, C₉ PFCAs, les C₄, C₆, C₈, C₁₀ PFSAs et le PFOSA. Les volumes d'AFFF utilisés sur ces sites d'entraînement varient de 800 à 13 000 L/an. Les types d'émulseurs utilisés sur les sites n'ont pas été communiqués. Sur les sites, 1 à 7 prélèvements ont été effectués dans des forages directement en aval des sites d'entraînement, dans l'aquifère supérieur et en dehors des membranes existantes sur les sites pour collecter l'eau. Les limites de quantification varient de 0,2 à 4 ng/L selon les PFAS. Aucune autre information n'a été communiquée.

2.3.2. Principaux résultats

Des PFAS ont été détectés dans les eaux souterraines sur 5 des 8 sites d'entraînement investigués avec des concentrations en PFAS total (\sum_{9} PFAS) pouvant atteindre jusqu'à 7,552 mg/L (Miljøministeriet, 2014). Les sites où les PFAS n'ont pas été détectés sont les sites où l'investigation a été jugée comme insuffisante (pas assez de puits échantillonnés). **Il a donc été conclu que les sites d'utilisation d'AFFF au Danemark sont des sources importantes de pollution des eaux souterraines.**

En moyenne sur les sites, les concentrations en PFOS et PFOA représentent la moitié de la concentration totale en PFAS mesurée. En outre, le PFHxA est aussi très présent et présente des concentrations similaires au PFOS. Le PFHpA et le PFHxS sont également présents en quantités significatives. En revanche, seules de très faibles quantités de PFNA, PFDS et FOSA ont été détectées dans les eaux souterraines des sites étudiés. Au vu de la signature chimique de la pollution, il a été conclu que les émulseurs utilisés sur ces sites étaient principalement constitués de PFAS de C₆ à C₈. Il convient toutefois de noter que les échantillons d'eau n'ont été analysés que pour ces neuf substances en raison de limitations techniques. Les auteurs indiquent donc que d'autres composés pourraient être présents dans les eaux souterraines sur les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies tels que des fluorotélomères ou des PFAS à chaînes ultra-courtes.

2.4. SUEDE

2.4.1. Contexte et méthodologie

En 2015, le département des sciences aquatiques et de l'évaluation de l'Université suédoise des sciences agricoles (le SLU) et l'Institut suédois de recherche sur l'environnement (IVL) ont publié une étude visant à caractériser les risques associés aux sites pollués par l'utilisation d'AFFF (Ahrens et al., 2015). Ces travaux devaient permettre de caractériser la nature et les concentrations en PFAS des eaux de surface et des sédiments à proximité du centre d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda. Les volumes d'émulseurs utilisés sur le site ne sont pas connus. De 1980s à 2003, du Sthalmex®-AFFF 3% (contenant du PFOS) a été utilisé puis remplacé par du Presto® AFFF et du Moussol® APS-P (sans PFOS). Il n'existe aucune information sur la nature des substances perfluorées présentes dans ces émulseurs. Des émulseurs sans PFAS sont utilisés depuis 2011. Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été effectuées entre 2009 et 2011 afin de suivre l'évolution spatiale et temporelle de la pollution. 21 poissons ont également été prélevés dans le lac et analysés afin d'évaluer le potentiel de bioaccumulation des PFAS (Ahrens et al., 2015).

Dans le même temps, le département des sciences environnementales appliquées de l'Université de Stockholm (IMT) et WGS Suède ont lancé une autre étude visant à comprendre le transport et le devenir des PFCAs et des PFSA sur un ancien aéroport militaire en activité de 1946 à 1986 (Filipovic et al., 2015). Des interviews avec d'anciens officiers du site ont permis de définir les endroits, les fréquences, les durées des interventions d'utilisation des AFFF pour des exercices de lutte contre les incendies et des interventions d'urgence. Les emplacements de stockage et de manipulation des AFFF ayant pu conduire à des pollutions sur le site ont aussi été identifiés. Les méthodologies employées dans ces deux études sont résumées dans le Tableau 4.

En 2020 a été publiée une étude menée par la Société géologique suédoise (la SGU) visant à évaluer l'impact sur les eaux souterraines des sites de manipulation de mousse extinctrice à travers toute la Suède (Rosenqvist, 2020). Cette étude présente des données analytiques provenant des bases de données de la SGU pour les réseaux d'eaux souterraines et la surveillance environnementale et des archives des sources d'eau suédoise auxquels s'ajoute les résultats de l'échantillonnage et de l'analyse des PFAS de 32 eaux souterraines (prélevées dans des piézomètres) et eaux brutes (provenant du réseau d'eau avant traitement) issues de 16 sites supplémentaires localisés dans le sud de la Suède. La méthodologie mise en place pour l'obtention des données n'a pas été décrite.

Tab : 4 : Stratégie appliquée à l'étude du centre d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda et d'un aéroport militaire suédois (Ahrens et al., 2015; Filipovic et al., 2015).

1 ^{ère} étude : Centre d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda (Ahrens et al., 2015)			
Matrices échantillonnées	Eaux de surface		Sédiments
Substances ciblées	11 PFAS recherchés sur la base des substances dont la présence à déjà été démontrée sur des sites d'utilisation d'AFFF : C ₆ -C ₁₁ PFCAs, C ₆ , C ₈ et C ₁₀ PFASs, le FOSA et le 6:2 FTS.		
Stratégie d'échantillonnage	33 échantillons issus de 18 emplacements (lacs, fossés et ruisseaux en aval de l'aéroport) prélevés plusieurs fois entre 2009 et 2011.	3 échantillons de sédiments de surface (0 à 30 cm) prélevés à plusieurs endroits du lac en aval du site.	
Méthodes de prélèvement	Bouteilles en PP, conservation à 4°C.		Prélèvement à la benne Ekman dans des bocaux en verre préalablement rincés et conservés à 4°C.
Préparation des échantillons	Filtration, extraction en phase solide (ISO/DIS 25101 :2009)		Lyophilisation, extraction solide-liquide (méthanol, bain ultrasonique + centrifugation)
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS		
Limites de quantification	Plusieurs dizaines à plusieurs centaines de pg/L		Plusieurs dizaines à plusieurs centaines de ng/kg
2 ^{ème} étude : Aéroport militaire (Filipovic et al., 2015)			
Matrices échantillonnées	Eaux de surface	Eaux souterraines	Sols
Substances ciblées	PFHxA, PFOA, PFHxS et PFOS		
Stratégie d'échantillonnage	14 échantillons d'eaux de surface (cours d'eau, lacs et d'étangs) prélevés à l'aide d'un échantillonneur à immersion	16 échantillons d'eau souterraine + 10 échantillons d'eau issus de puits utilisés pour l'alimentation du réseau prélevés par pompage.	45 échantillons prélevés à des profondeurs de 0 à 2 m (5 sur le lieu d'incendie, 25 au niveau du centre de stockage d'AFFF, 5 sur le site d'entraînement à la lutte contre les incendies. + échantillons prélevés tous les 0,5 m dans des carottes de sol de 4 m sur chaque site d'activité (stockage, entraînement et intervention d'urgence).
Méthodes de prélèvement	Echantillonneur à immersion Collectés dans des bouteilles en PEHD et conservés à 4°C	Echantillonneur à immersion Collectés dans des bouteilles en PEHD et conservés à 4°C	Prélevés à la pelle dans des sceaux rincés au méthanol ou sur des carottes de sol prélevées à l'aide d'une foreuse à chenilles
Préparation des échantillons	Filtration (GF/C, diamètre 47 mm), extraction en phase solide (ISO/DIS25101, 2008)		Lyophilisation, extraction solide-liquide (méthanol, bain ultrasonique + centrifugation)
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS		
Limites de quantification	0,5 à 1 ng/L		0,1 à 2 µg/kg
Commentaires : les tuyaux ont été testés dans un réservoir d'eau pendant plusieurs heures pour vérifier qu'ils n'entraînaient pas la lixiviation de PFAS avant l'échantillonnage de l'eau souterraine. Les huiles et les graisses de l'appareil de forage utilisé pour les échantillons de sols ont été analysées pour déterminer leur teneur en PFAS avant forage. Le foret a été essuyé avec un tissu imbibé de méthanol pour minimiser la contamination croisée entre les points d'échantillonnage du sol.			
3 ^{ème} étude : Evaluation de l'impact sur les eaux souterraines des sites de manipulation de mousse extinctrice (Rosenqvist, 2020)			
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Eaux potables non traitées
Substances ciblées	11 à 32 PFAS dont PFBA, PFPeA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS, 6:2 FTSA, PFPeS.		
Stratégie d'échantillonnage	nc		
Méthodes de prélèvement	nc		nc
Préparation des échantillons	nc		nc
Analyse et quantification	nc		nc
Limites de quantification	nc		nc
nc : non communiqué			

2.4.2. Principaux résultats

Sans surprise, ces études montrent que les PFAS suivent deux voies principales de transport depuis les sites d'utilisation d'AFFF : le ruissellement en surface des sols depuis le site vers les eaux de surface, et l'infiltration jusqu'aux nappes phréatiques. La Σ 4-11 PFAS atteint jusqu'à 8 739 µg/kg dans les sols, 344 ng/L dans les eaux de surface, et 51 000 ng/L dans les eaux souterraines. Le PFOS et le PFHxS sont largement prédominants dans les sols, les eaux de surface, les eaux souterraines et les sédiments qui recueillent les eaux de ruissellement de ces sites. Le PFOS domine aussi dans les poissons échantillonnés (Σ 4-11 PFAS max : 370,8 µg/kg pour des teneurs en PFOS seul allant de 76,5 à 370 µg/kg), soulignant un possible impact sur la santé humaine en cas d'ingestion (à ce jour, les teneurs maximales réglementées au niveau européen pour le PFAS sont résumées dans le Tableau 5).

Tab. 5 : Teneurs maximales règlementées au niveau européen pour le PFAS applicables depuis le 1^{er} janvier 2023 pour les aliments considérés comme plus à risque (valeurs exprimées en µg/kg de poids frais, d'après le [règlement UE 2022/2388](#)).

Teneurs maximales règlementées	PFOS*	PFOA*	PFNA*	PFHxS*	Somme des 4
Œufs	1,0	0,3	0,7	0,3	1,7
Crustacés, mollusques et bivalves	3,0	0,7	1,0	1,5	5,0
Toute chair musculaire de poisson hors cas ci-dessous	2,0	0,2	0,5	0,2	2,0
Chair musculaire de poissons énumérés au point 10.2.1.2 du règlement UE 2022/2388	7,0	1,0	2,5	0,2	8,0
Chair musculaire de poissons énumérés au point 10.2.1.3 du règlement UE 2022/2388	35	8,0	8,0	1,5	45,0
Viande de bovin, de porc et volaille	0,3	0,8	0,2	0,2	1,3
Viande de mouton	1,0	0,2	0,2	0,2	1,6
Abats de bovin, mouton, porc et volaille	6,0	0,7	0,4	0,5	8,0
Viande de gibier (à l'exclusion des viandes d'ours)	5,0	3,5	1,5	0,6	9,0
Abats de gibier (à l'exclusion des abats d'ours)	50	25	45	3,0	50

*La teneur s'applique à la somme des stéréo-isomères (linéaires et ramifiés). Toutes les valeurs inférieures à la limite de quantification sont considérées comme nulles.

Les teneurs en PFAS dans les différentes zones des sites étudiés suivent la fréquence d'utilisation des AFFF dans ces zones avec des teneurs en PFOA et PFOS plus élevées sur les sites les plus fréquemment utilisés (Filipovic et al., 2015). D'autre part, la distribution des PFAS en profondeur diffère d'une zone à l'autre (cf. Figure 1).

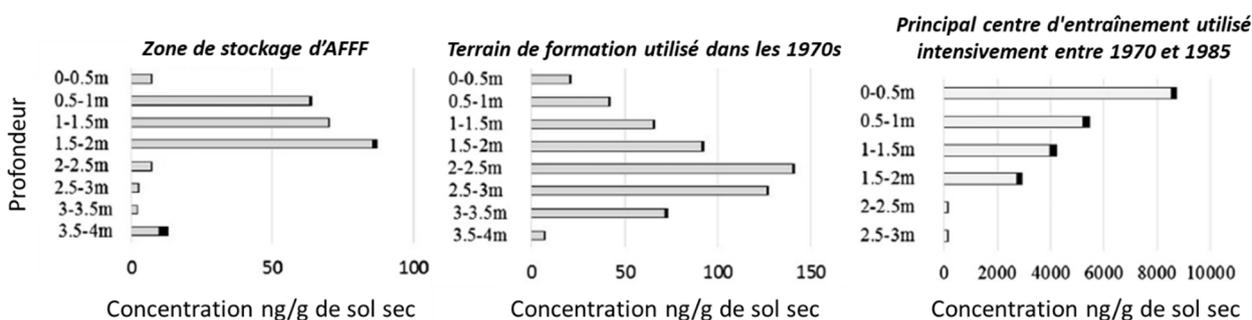


Figure 1 : Evolution des teneurs en PFOS et PFOA dans les carottes de sol de différentes zones du site d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Stockholm Arlanda avec la profondeur (traduit d'après Filipovic et al., 2015).

Les profils de composition en PFAS à proximité du site diffèrent de celui des eaux de surface avec une plus grande proportion de PFOS, confirmant le potentiel de sorption plus élevé du PFOS que celui du PFHxS et du PFOA. Ces résultats confirment que les PFAS à chaîne courte (< C₈) sont principalement transportés dans la phase aqueuse, tandis que les PFAS à chaîne longue (≥ C₈) sont plus fortement retenus dans le sol et les sédiments et peuvent s'accumuler plus facilement dans la chaîne alimentaire.

Enfin, sur le premier site, les concentrations de PFAS dans le lac à proximité de l'aéroport n'ont pas montré de tendance à la baisse entre 2009 et 2013, malgré l'arrêt de l'utilisation d'AFFF au PFOS en 2003. Cela montre une grande persistance du PFOS dans les milieux et/ou un apport de PFOS via la dégradation de précurseurs non recherchés mais présents dans la composition des émulseurs utilisés sur le site.

2.5. FINLANDE

2.5.1. Contexte et méthodologie

En 2019, afin d'évaluer les risques posés par l'utilisation des AFFF, l'Institut finlandais de l'environnement (SYKE) a publié une étude portant sur quatre sites de formation à la lutte contre les incendie : un site appartenant aux pompiers, deux aéroports, et une raffinerie de pétrole (Reinikainen et al., 2022, 2019). Seuls quelques-uns des émulseurs utilisés ont pu être identifiés sur les sites : Sthamex® AFFF 3% (au PFOS) et Tovalex® green. La composition chimique détaillée de ces émulseurs n'est pas documentée. Les méthodologies utilisées sont résumées dans le Tableau 6. Les plans d'échantillonnage ont été mis en place sur la base d'informations collectées lors d'études antérieures, des expertises locales et des visites de terrain. En fonction des caractéristiques des sites, l'échantillonnage a été spécifiquement ciblé sur certaines matrices environnementales. Sur certains des sites, des poissons et des vers de terre ont également été échantillonnés pour évaluer la capacité de bioaccumulation des PFAS.

Tab. 6 : Stratégie appliquée à l'étude de quatre sites d'utilisation d'AFFF en Finlande (Reinikainen et al., 2022, 2019).

Matrices échantillonnées	Eaux de surface	Eaux souterraines	Sols	Sédiments
Substances ciblées	23 PFAS : C ₄ -C ₁₆ PFCAs, le C ₄ , C ₆ -C ₈ et C ₉ PFSAs, le 4:2, 6:2 et 8:2 FTSA, le FOSA et l'EtFOSA.			
Stratégie d'échantillonnage	73 eaux prélevées à 20 cm de profondeur dans les ruisseaux, cours d'eau et lacs en amont et aval, des zones étudiées.	26 eaux prélevées en surface de la nappe dans tous les piézomètres des sites	24 sols prélevés : 1 au milieu du terrain d'entraînement, les autres entre 50 et 100 m du centre du terrain.	2 sédiments issus de cours d'eau ou de lacs en aval des sites.
Méthodes de prélèvement	Bouteilles en PEHD	Prélevées avec un bailler et placées dans des bouteilles en PEHD	Prélevés avec un « Grass Plot » et transférés dans un sac en PEBD. Echantillonnage composite (1 échantillon pour 200 à 500 m ² = 50 échantillons de 20 g prélevés dans les 5 premiers cm du sol).	Echantillonnage composite (1 échantillon pour 200 à 500 m ² = 50 échantillons de 20 g prélevés dans les 5 premiers cm des sédiments).
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide		Lyophilisation, extraction solide-liquide (méthanol, bain ultrasonique + centrifugation)	
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS		HPLC-MS/MS	
Limites de quantification	0.1 à 0.5 ng/L		0.01 à 0.1 µg/kg	
Commentaires : Afin de minimiser le risque de contamination, cette étude recommande d'éviter certains matériaux ou polymères pour les vêtements du personnel de terrain, et le matériel d'échantillonnage : le PTFE, le FEP et l'ETFE et les accessoires revêtus de composés fluorés (ex : Goretex).				

2.5.2. Principaux résultats

Cette étude montre que les risques les plus importants causés pour l'environnement et la santé par les sites impactés par l'utilisation d'AFFF concernent surtout le milieu aquatique en raison d'une migration des PFAS depuis les sols impactés vers les eaux souterraines via les eaux de ruissellement ($\sum_{23\text{-PFAS}} \text{max}$: 73 300 ng/L dans les eaux de surface, 4 000 ng/L dans les eaux souterraines, 508 µg/kg dans les sédiments, 3 240 µg/kg dans les sols). Une $\sum_{23\text{-PFAS}} \text{max}$ de 184 µg/kg a été retrouvée dans les poissons, Reinikainen et al., 2022, 2019).

Tab. 7 : Les six PFAS les plus abondants mesurés dans chaque matrice sur quatre sites d'entraînement à la lutte contre les incendies finlandais.

	Eaux de surface	Eaux souterraines	Eaux usées	Sol	Sédiment	Poissons	Vers de terre
Top 6 des PFAS les plus abondants	PFOS	PFOS	PFOS	PFOS	PFTTrDA	PFOS	PFOS
	6:2 FTSA	PFHxS	PFPeA	FOSA	PFOS	PFUnDA	PFHxS
	PFHxS	PFHxA	PFHxS	8:2 FTSA	PFUnDA	PFDA	PFBS
	PFHxA	6:2 FTSA	PFBA	PFTTrDA	8 :2 FTSA	PFNA	PFPeA
	PFNA	PFBS	PFHxA	PFUnDA	6 :2 FTSA	PFTTrDA	8:2 FTSA
	PFPeA	PFHpS	PFBS	6:2 FTSA	PFNA	PFDoA	PFUnDA

La prédominance du PFOS dans toutes les matrices des sites étudiés (cf. Tableau 7, Figure 2) peut s'expliquer par l'évolution de la composition des AFFF : les plus anciennes formulations utilisées sont les AFFF en C₈ produites par fluoration électrochimique (ECF) et contenant du PFOS. L'évolution de la réglementation a conduit dans les années 2010s au remplacement progressif des mousses AFFF en C₈ produites par ECF par des AFFF en C₈ puis en C₆ produites par fluorotéomérisation. Ce changement est marqué par l'apparition dans l'environnement de fluorotélomères (ex : 6:2 FTSA) et de PFAS à chaînes plus courtes (ex : PFHxS, PFHxA). La proportion des autres PFAS présents varie ensuite selon les matrices. Le 6 :2 FTSA, le PFHxS, le PFHxA prédominent dans les eaux de surface et les eaux souterraines, le 6:2 et 8:2 FTSA, le PFTrDA et le PFUnDA prédominent dans les sols et les sédiments (cf. Tableau 7).

Ainsi, si l'historique (volumes, périodes d'utilisation) et la composition chimique des mousses anti-incendie utilisées sur les sites ne sont pas connues, les études environnementales et l'évaluation des risques ne doivent donc pas se limiter à la recherche du PFOS mais intégrer un plus large panel de composés ayant déjà été identifiés dans certains émulseurs comme les 6:2 et 8 :2 FTSA, le PFUnDA, et le PFTrDA.

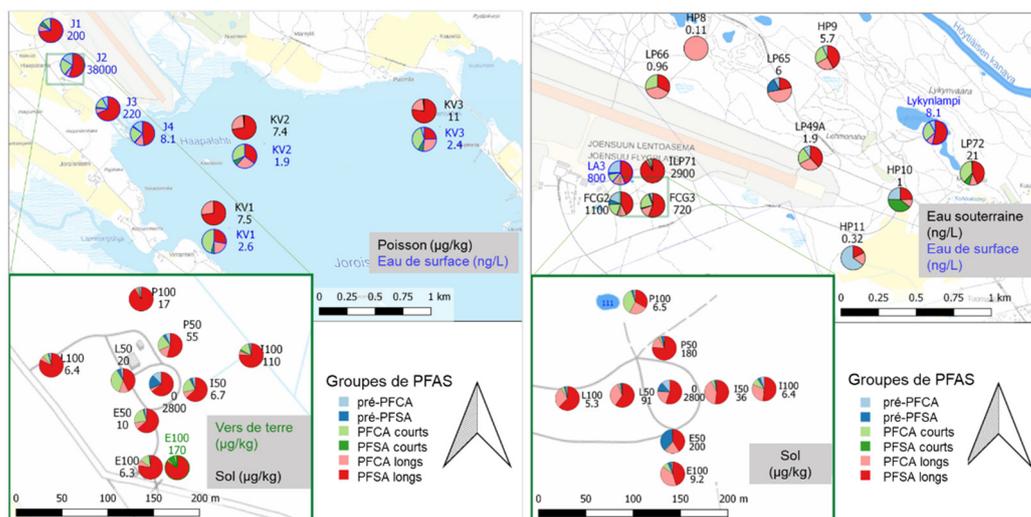


Figure 2 : Distribution des PFAS dans différentes matrices échantillonnées sur deux sites d'utilisation d'AFFF finlandais (modifié et traduit depuis Reinikainen et al., SYKE 2019).

2.6. NORVEGE

2.6.1. Contexte et méthodologie

De nombreuses campagnes ont eu lieu en Norvège afin de mieux caractériser les pollutions causées par l'utilisation des mousses anti-incendie. Une première campagne menée par les autorités norvégiennes de contrôle de la pollution (le SFT) et le département sol et environnement de l'Institut norvégien de recherche agricole et environnementale (Bioforsk) a été lancée en 2008 (SFT, 2008) pour évaluer les risques que représentent quatre installations d'entraînement à la lutte contre les incendies norvégiens pour l'environnement.

En 2011, une autre campagne menée par le Centre de recherche sur l'homme, la technologie et l'environnement de l'École des sciences et de la technologie de l'Université d'Orebro (MTM) et la fondation Det Norske Veritas (DNV) a eu pour objectif de mesurer la teneur / concentration de certains PFAS dans les sols, sédiments, l'eau et le biote autour d'une installation d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Flesland en Norvège (Kärman et al., 2011).

Sur la même période, Sweco Norge et Cowi AS ont mené une autre enquête sur les aéroports norvégiens pour le compte d'AVINOR, la société qui exploite la plupart des aéroports civils norvégiens (AVINOR, 2012a, 2012b). Cette étude devait dresser l'inventaire des pollutions des sols, des eaux souterraines et des eaux de surface rencontrées sur les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies de 45 aéroports.

L'institut géotechnique Norvégien et le Département des géosciences de l'Université d'Oslo ont publié une étude visant à déterminer les quantités de PFOS présentes sur un site d'entraînement à la lutte contre les incendies 15 ans après la fin de ses activités (Høisæter et al., 2019). Une pollution des eaux souterraines et du sol par des PFAS en dehors des zones de collecte des effluents avait été identifiée sur le site en 2008 (SFT, 2008). Cette étude s'est accompagnée d'essais sur colonnes en laboratoire pour comprendre si les niveaux résiduels de pollution détectés peuvent constituer une source de pollution à long terme des eaux souterraines. Des vers de terre et des escargots de mer ont également été prélevés sur les sites ou à proximité.

Les méthodologies utilisées lors de ces études (si disponibles) sont résumées dans le Tableau 8.

Tab. 8 : Stratégie d'échantillonnage et méthodologies appliquées à l'étude de différents sites d'utilisation d'AFF en Norvège (AVINOR, 2012a, 2012b; Høisæter et al., 2019; Kärman et al., 2011; SFT, 2008).

1 ^{ère} étude : installation d'entraînement à la lutte contre les incendies (SFT, 2008)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines	Eaux de surface	Sols	Sédiments
Substances ciblées	19 PFAS : C ₄ , C ₆ , C ₈ , C ₁₀ PFASs, C ₆ -C ₁₄ PFCAs, 6:2 FTSA, FOSA, MeFOSA, EtFOSA, MeFOSE, EtFOSE			
Stratégie d'échantillonnage	Dans 3 puits sur et en aval des sites.	Prélevé dans un cours d'eau proche d'un des sites.	Prélevés à tous les 10 à 20 cm de profondeur jusqu'à la nappe à des distances de 15 à 200 m des sites.	Echantillons composites prélevés dans des cours d'eau, des sorties du drainage des sites, en bord de mer à proximité des sites.
Méthodes de prélèvement	Pompage. Echantillons placés dans une bouteille en PE.	Prélevé dans une bouteille en PE.	n.c.	Prélevés dans des conteneurs en PE
Préparation des échantillons	Filtration		Séchés à l'air, extraction liquide-solide au (méthanol ultrasonication)	
Analyse et quantification	Quantification : standards internes. HPLC-HRMS		Quantification : standards internes. HPLC-HRMS	
Limites de quantification	n.c.		n.c.	
1 ^{ère} étude : installation d'entraînement à la lutte contre les incendies de l'aéroport de Flesland en Norvège (Kärman et al., 2011)				
Matrices échantillonnées	Sols		Sédiments	
Substances ciblées	15 PFAS ciblés sur la base d'études antérieures montrant la présence de ces PFAS sur plusieurs sites d'utilisation de mousses anti-incendie: C ₄ , C ₆ , C ₈ , C ₁₀ PFASs, les C ₅ -C ₁₄ PFCAs et le 6 :2 FTS.			
Stratégie d'échantillonnage	10 échantillons prélevés sur le terrain d'entraînement		9 échantillons ont été prélevés dans le lac où s'écoulent les eaux d'infiltration du site	
Méthodes de prélèvement	Bouteilles en polypropylène conservés à -20°C.		Bouteilles en polypropylène conservés à 4°C.	
Préparation des échantillons	Lyophilisation, extraction solide-liquide (4mL d'AcN, d'ultrasonication + centrifugation)		Lyophilisation, extraction solide-liquide (4mL d'AcN, d'ultrasonication + centrifugation)	
Analyse et quantification	Quantification : standards internes UPLC-MS/MS		Quantification : standards internes UPLC-MS/MS	
Limites de quantification	n.c.		n.c.	
2 ^{ème} étude : état des lieux des contamination du sol et de l'eau sur les aéroports norvégiens (AVINOR, 2012a, 2012b)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Sols	
Substances ciblées	4 PFAS ciblés sur la base d'études antérieures montrant que ces PFAS ont été des composés majeurs de nombreux émulseurs utilisées avant les années 2010 : PFOS, PFOA, 6 :2 FTSA et 8 :2 FTS.			
Stratégie d'échantillonnage	Echantillonnage en croix sur une zone de 60m entourant les sites d'entraînement. Des forages ont été creusés pour l'échantillonnage de sols et d'eau souterraine dans quatre directions par rapport à la zone d'entraînement (4 puits ont été mis en place autour de la zone d'entraînement, puis 1 puits/15 mètres dans les deux directions de l'espace). Pour chaque emplacement, 1 échantillon de sol a été prélevé dans les 10 à 20 cm premiers centimètre de sol, et un à la limite de la nappe phréatique. 900 sols et 200 échantillons d'eau souterraine ont été collectés.			
Méthodes de prélèvement	n.c.		n.c.	
Préparation des échantillons	n.c.		n.c.	
Analyse et quantification	n.c.		n.c.	
Limites de quantification	2,5 à 10 ng/L		1,7 à 3,5 µg/kg	
3 ^{ème} étude : sites d'entraînement à la lutte contre les incendies après 15 ans sans utilisation d'AFF contenant du PFOS (Høisæter et al., 2019)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Sols	
Substances ciblées	12 PFAS : C ₄ -C ₈ PFCAs, les C ₄ , C ₆ -C ₈ PFASs, et le 4:2, 6:2 et 8:2 FTS			
Stratégie d'échantillonnage	95 eaux échantillonnées au cours de 19 campagnes dans 5 piézomètres installés pour intercepter le panache émis depuis le site.		Prélevés à 80 endroits dans la zone non saturée autour des plates-formes d'entraînement à la lutte contre l'incendie. 288 échantillons de sol prélevés à 4 niveaux de profondeurs (de la surface jusqu'à la nappe :0-1 m, 1-2 m, 2-3 m et 3-4 m) dans des forages.	

Méthodes de prélèvement	Echantillons stockés dans des bouteilles PEHD à 4 °C.	Transféré dans des sacs d'échantillonnage en polyamide et stocké à 4 °C.
Préparation des échantillons	(DIN 38407-42, 2011)	Extraction solide-liquide à l'acétonitrile (DIN 38414-14, 2011)
Analyse et quantification	LC/MS-MS	LC/MS-MS
Limites de quantification	0,3 ng/L	0,2 à 1 µg/kg
Commentaires : Tout le matériel a été rincé au méthanol avant l'échantillonnage de sol.		

n.c. : non communiqué

2.6.2. Principaux résultats

Ces études montrent dans une grande majorité des cas une forte pollution par les PFAS des environnements proches (0-20 m) des centres d'entraînement ou des sites d'utilisation des mousses étudiés. Sur les sites les plus anciens, le PFOS domine largement. En revanche, sur les sites d'entraînement en activité depuis moins longtemps, le 6:2 FTSA est présent en plus grande quantité marquant un changement des formulations d'émulseur (passage du C₈ au fluorotélomère). Ainsi, selon les sites, des niveaux élevés de PFOS (jusqu'à 31 000 µg/kg) mais aussi de 6:2 FTSA (jusqu'à 2 101 µg/kg) ont été mesurés dans les sols des sites.

Dans les zones les plus fortement impactées, la pollution du sol atteint la nappe phréatique parfois située à plus de 4 m de profondeur avec des concentrations de PFOS et de 6 :2 FTSA atteignant parfois les 1 400 µg/L et les 39,8 µg/L respectivement. Ces fortes concentrations ont été retrouvées en surface dans un périmètre de 45 mètres autour de la zone source mais aussi dans les sédiments, les eaux de surface et la mer. Une bioaccumulation de 6 :2 FTSA, PFTrDA, PFOS et de PFDS a également été observée dans le foie des poissons et dans certains crabes, les vers de terre et les escargots de mer sur plusieurs des sites (Kärman et al., 2011; SFT, 2008).

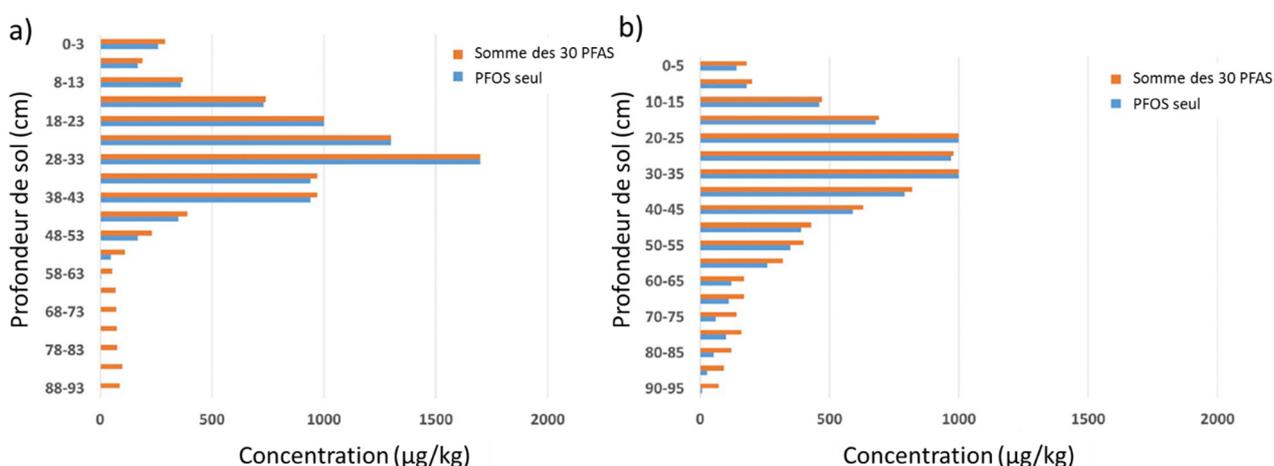


Figure 3 : Evolution de la concentration en PFOS et de la somme des concentrations des 30-PFAS mesurés dans le sol (cette somme comprend le PFBS, PFHxS, PFHpS, le PFOS, le PFDeS, le PFBA, le PFPeA, le PFHxA, PFHpA, le PFOA, le PFNA, le PFDeA, le PFUnA, PFDoA, PFTrDA, PFTeDA, le PFHxDA, FOSA, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, le 7H-Dodecafluoroheptanoic acid, le Perfluoro-3,7-dimethyl acid (PF-3,7-DMOA), l'EtFOSA, EtFOSAA, EtFOSA, MeFOSAA, MeFOSE, MeFOSA, FOSAA) d'une colonne pour des expériences avec de faibles (a) taux d'infiltration faible (a) et élevée (b) (traduit d'après Høisæter et al., 2019).

Ces études ont montré également que la nature du sol joue un rôle important dans la propagation verticale de la pollution. Lorsque les essais sur colonne sont réalisés avec des sols denses ou peu perméables, ou que la zone d'entraînement est située sur de tels sols riches en argile, les teneurs les plus élevées sont observées dans les couches supérieures du sol, même plusieurs années après la fin des entraînements (Figure 3, Høisæter et al., 2019). Lorsque le sol est constitué de sable et de gravier perméables, les teneurs en PFAS sont plus importantes en

profondeur en raison d'un plus grand taux d'infiltration. L'augmentation de la teneur en limon et en argile des sols réduit également l'absorption des PFAS par les vers de terre. La capacité des PFAS à se bioaccumuler dans les organismes étudiés augmente avec la longueur de la chaîne carbonée.

2.7. PAYS BAS

2.7.1. Contexte et méthodologie

Suite à un rejet accidentel d'AFFF sur l'aéroport de Schiphol d'Amsterdam en 2008, des échantillons d'eau, de poissons et de sédiments ont été prélevés sur le site en 2008 et 2011 et analysés par l'Institut des ressources marines et de l'étude des écosystèmes de l'Université de Wageningen (l'IMARES) afin de déterminer l'ampleur de la pollution engendrée par l'accident (Kwadijk et al., 2014). Si des essais à la lutte contre les incendies sont effectués sur cet aéroport, cette étude s'est plus particulièrement intéressée aux effets des rejets accidentels d'AFFF. Il s'agissait notamment de caractériser les concentrations en PFAS dans l'environnement du site et d'évaluer leurs variations temporelles. La méthodologie appliquée sur le site est résumée dans le Tableau 9.

Tab. 9 : Stratégie appliquée à l'étude de l'aéroport de Schiphol d'Amsterdam, au Pays Bas (Kwadijk et al., 2014).

Matrices échantillonnées	Eaux de surface	Sédiments
Substances ciblées	3 PFAS ciblés : PFOS, PFBS et PFHxS	
Stratégie d'échantillonnage	3 eaux prélevées deux fois en 2008 et 2011 dans un canal entourant l'aéroport à 2 km du site 3 jours après la fuite, à 4 km en amont du site, sur un site adjacent et 13 km en aval du site.	3 sédiments prélevés deux fois (2008 et 2011) aux mêmes endroits que l'eau. Echantillons composites de plusieurs échantillons de surface (0-10 cm) prélevés sur un rayon de 30 m.
Méthodes de prélèvement	Stockés dans des bouteilles en verre nettoyées à l'acétone conservés à 4°C.	Stockées dans des bocaux en verre à température ambiante.
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide (cartouches OASIS HLB SPE)	Tamisage (63 mm), lyophilisation, extraction (acétonitrile, ultrasonication)
Analyse et quantification	Quantification : standards internes HPLC-MS/MS	Quantification : standards internes HPLC-MS/MS
Limites de quantification	n.c.	n.c.
Commentaires : Les bouteilles pour l'échantillonnage de l'eau ont été rincées trois fois avec de l'eau de surface avant le prélèvement. Un morceau de papier d'aluminium a été inséré entre le bouchon et la bouteille afin d'éviter toute contamination par le bouchon.		
n.c. : non communiqué		

2.7.2. Principaux résultats

L'étude révèle que le déversement accidentel d'AFFF a conduit à une pollution des eaux, des sédiments et une accumulation de PFAS dans les poissons des canaux à proximité du site. Le PFOS est le PFAS prédominant dans les eaux, les sédiments et les poissons échantillonnés. Les faibles concentrations de PFBS et de PFHxS observées dans les poissons et les sédiments (contrairement au PFOS) confirment que le potentiel de (bio)accumulation augmente avec la longueur de la chaîne carbonée.

Entre 2008 et 2011, une forte baisse de la concentration en PFOS est observée dans les eaux et les poissons sur tous les sites échantillonnés, probablement en raison de l'arrêt de l'utilisation du PFOS dans les AFFF suite à son interdiction. Cependant, la teneur dans les sédiments a faiblement baissé (Kwadijk et al., 2014). Cela pourrait signifier une forte rétention du PFOS dans les sédiments.

2.8. ESPAGNE

2.8.1. Contexte et méthodologie

Dans le cadre du projet Européen PROMISCES (*Preventing Recalcitrant Organic Mobile Industrial chemicalS for Circular Economy in the Soil-sediment-water system*, <https://promiscses.eu/>), des investigations ont été menées sur site espagnol utilisé dans le cadre d'activités de formation à la lutte contre les incendies depuis les années 1990 (PROMISCES, López de Alda, 2023). Les objectifs de cette caractérisation étaient notamment d'identifier les zones polluées sur le site, les PFAS les plus abondants et les plus fréquemment détectés dans les eaux souterraines et de mieux comprendre le transport des PFAS du sol vers les eaux souterraines. La méthodologie utilisée est résumée dans le Tableau 10.

Tab. 10 : Stratégie appliquée à un site d'entraînement à la lutte contre les incendies en Espagne (PROMISCES, López de Alda, 2023).

Matrices échantillonnées	Eaux souterraines	Sols
Substances ciblées	41 PFAS : C4-C14, C16, C18 PFCAs, C4-C11 PFSAs, 4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, 6:2 diPAP, 8:2 diPAP, ADONA, EtFOSA, EtFOSAA, FOSAA, MeFOSAA, MeFOSA, HFPO-DA, FOSA, PFMOAA, PFMOPrA, PFMOBA, PFO2HxA, PFO3OA, PFO4DA.	
Stratégie d'échantillonnage	Un échantillon a été prélevé dans chacun des 6 puits forés et installés par forage rotatif sur et en aval hydraulique des zones d'entraînement identifiées sur le site.	Lors du forage des puits, des carottes ont été récupérées en continu depuis le sol jusqu'à la profondeur totale du forage (10 m). 1 sous-échantillon a été sélectionné dans deux des carottes de sol (une située sur une zone d'entraînement et l'autre en aval) au niveau de la zone non saturée (2,70-2,90 m), du toit de la nappe (5,0-5,1 m) et de la zone saturée (9-9,15 m).
Méthodes de prélèvement	Stockage : bouteilles PET de 1 litre	Stockage : boîtes en plastique exemptes de PFAS
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide (SPE)	Extraction en phase solide (SPE) : extraction au méthanol, ultrasonication, centrifugation.
Analyse et quantification	LC-H ?RMS/MS	LC-MS/MS
Limites de quantification	0,13 à 5,44 ng/L	0,03 à 1,488 µg/kg

2.8.2. Principaux résultats

Cette étude montre que des PFAS ont été identifiés dans les échantillons d'eau souterraine et de sol. Les concentrations dans les eaux atteignent jusqu' à 112 µg/L pour le PFPeA. 19 PFAS ont été quantifié dans les eaux souterraines du site. Parmi ces derniers, des PFCAs, des PFSAs et des FTS. La concentration totale en PFAS ($\sum_{41} \text{PFAS}$) mesurée varie de 45 ng/L à 126 µg/L dans les eaux souterraines. Seuls des PFAS avec des longueurs de chaîne $\leq C_{12}$ ont été quantifiées.

En ce qui concerne les sols, 11 PFAS ont été quantifiés dont les PFCAs, les PFSAs et les FTS. Les teneurs mesurées atteignent jusqu'à 17,8 µg/kg pour le PFOS, suivi du 6:2 FTSA (2,47 - 6,33 µg/kg), du PFHpS, du PFBS et du PFHxS (de 0,36 ng/g pour le PFHxS à 2,86 ng/g pour le PFBS). Seuls des PFAS avec des longueurs de chaîne $\leq C_9$ ont été quantifiées.

De plus, les résultats montrent que les PFAS à chaînes longues sont davantage retenus dans la zone non saturée en raison du coefficient de partage entre l'air et l'eau qui favorise leur rétention. De manière générale, les teneurs en PFAS à chaînes longues diminuent avec la profondeur, tandis que celles en PFAS à chaînes courtes (ex : PFBS, PFBA etc.) augmentent, probablement en raison de la dégradation des précurseurs.

2.9. AUSTRALIE

2.9.1. Contexte et méthodologie

L'Université Claude Bernard Lyon, le CNRS, l'Institut Florey des neurosciences et de la santé mentale de l'Université de Melbourne, et le Centre de recherche Homme-Technologie-Environnement (MTM) de l'Université d'Örebro ont publié une étude en 2017 (Bräunig et al., 2017) visant à évaluer la concentration et la distribution des PFAS dans différentes matrices (eau sol et biote) à proximité d'un centre d'entraînement à la lutte contre les incendies d'un terrain d'aviation militaire australien. L'utilisation du site depuis les années 1970s et les fuites de réservoirs de stockage souterrain de concentrés d'AFFF ont engendré une pollution des eaux souterraines sur ce site. Le contexte hydrogéologique du site a favorisé la propagation du panache sur plusieurs kilomètres causant des restrictions d'usage de l'eau. La principale formulation d'AFFF utilisée sur le site est le Light Water™ 3M 6% contenant du PFOS et de PFHxS, et des précurseurs (Backe et al., 2013; Houtz et al., 2013). Ce produit a été remplacé par l'AFFF ANSUL Ansulite® dès 2005 majoritairement composé de fluorotélomères connus comme étant des précurseurs de PFCAs (BRGM, 2024a; Houtz et al., 2013; Place and Field, 2012). En supplément, des œufs de poule, de l'herbe, le sérum de 10 résidents, de vaches, de chevaux et de moutons vivant dans la zone investiguée ont été échantillonnés. La méthodologie appliquée est résumée dans le Tableau 11.

Tab. 11 : Stratégie appliquée à l'étude d'un centre d'entraînement à la lutte contre les incendies d'un terrain d'aviation militaire australien (Bräunig et al., 2017).

Matrices échantillonnées	Eaux de surface	Eaux souterraines	Sols
Substances ciblées	10 PFAS ciblés : C ₄ -C ₁₀ PFCAs, C ₄ , C ₆ , C ₈ PFSA		
Stratégie d'échantillonnage	Un échantillon prélevé dans le lac à proximité du lac.	10 échantillons prélevés dans des puits/piézomètres situés dans le panache de contamination et dans des zones inondées par les eaux de surface provenant de l'aérodrome.	10 échantillons prélevés en surface (0-10cm) dans des jardins privés situés dans le panache de contamination et dans des zones inondées par les eaux de surface provenant de l'aérodrome.
Méthodes de prélèvement	n.c.	n.c.	n.c.
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide		Séchage, extraction solide-liquide (ultrasonication + méthanol/NH ₃ ⁺ centrifugation)
Analyse et quantification	HPLC-MS/MS		HPLC-MS/MS
Limites de quantification	50 à 170 ng/L		0,1 à 0,34 µg/kg
n.c. : non communiqué			

2.9.2. Principaux résultats

Sans surprise, le PFOS et le PFHxS, composés majeurs des mousses AFFF utilisées sur les sites étudiés, sont prédominants dans toutes les matrices étudiées. Les plus fortes concentrations de PFOS atteignent 13 µg/L dans les eaux souterraines et 1 692 µg/kg dans les sols du site. Les résultats montrent également que le PFHxS, PFAS à chaîne courte (C₆), a été lessivé plus loin dans la colonne de sol que le PFOS et les autres PFAS (Bräunig et al., 2017). Cela confirme que la capacité de sorption des PFAS dans le sol augmente avec la longueur de la chaîne carbonée. Il est également observé que les PFSA s'adsorbent plus fortement que les PFCAs pour une même longueur de chaîne carbonée.

L'étude conclut que l'arrosage des cultures avec de l'eau des forages marqués, et les inondations occasionnelles des drains provenant de l'aérodrome après de fortes pluies sont à l'origine de la pollution du sol dans le voisinage du site. D'autre part, l'utilisation continue d'eaux souterraines impactées sur le site semble avoir créé de nouvelles sources de pollutions des sols depuis lesquelles les PFAS ont pu migrer à nouveau vers les eaux souterraines et s'accumuler dans les plantes et les légumes. Ces effets sont néanmoins variables selon l'hydrophobicité des substances et des caractéristiques locales du sol.

2.10. ETATS UNIS D'AMÉRIQUE

2.10.1. Contexte et méthodologies

Depuis les années 2000 et la détection de PFAS dans les eaux souterraines de sites d'utilisation de mousses anti-incendie, le centre d'ingénierie civile de l'U.S. Air Force (USAF) a procédé à des échantillonnages sur des zones d'entraînement à la lutte contre l'incendie de bases militaires et a confirmé la présence de certains PFAS dans les sols et les eaux souterraines des sites exploités depuis les années 1970. Dans ce contexte, le département d'ingénierie civile et environnementale de l'Université de Californie et de l'école des Mines du Colorado ainsi que le département de toxicologie environnementale et moléculaire de l'Université d'État de l'Oregon ont publié une étude visant à évaluer la transformation des précurseurs présents dans les AFFF sur un site d'entraînement à la lutte contre les incendies d'une base aérienne active de 1942 et 1990 (Houtz et al., 2013). Après avoir analysé des formulations de mousses AFFF archivées par l'armée américaine (3M, Ansul, Chemguard, National Foam, and Buckeye), les substances identifiées dans ces émulseurs ont été recherchées dans des eaux souterraines et les sols du site. Les AFFF 3M, National Foam et Ansul ont probablement été utilisées sur les sites puisqu'il s'agit des AFFF approuvées pour l'usage militaire aux Etats Unis de 1976 à 1990.

Un peu plus tard, en 2016, l'USAF et Nobilis ont étudié la présence de PFAS sur 10 installations actives de l'USAF à travers les états Unis (Anderson et al., 2016) afin de caractériser la nature et les teneurs en PFAS sur des sites où différents volumes d'AFFF ont été utilisés. Les sites sélectionnés sont : des sites d'intervention d'urgence (faible volume d'AFFF utilisé, généralement un seul rejet), des zones de stockage (volume moyen d'AFFF, 1 à 5 rejets sur la période d'activité), des zones d'essais et de maintenances (volume élevé d'AFFF utilisé, rejets réguliers sur la période d'activité).

Plus récemment, trois autres études menées par GSI Environnemental Inc., le Département d'ingénierie civile et environnementale de l'école des Mines du Colorado, le Département de toxicologie environnementale et moléculaire de l'Université d'État de l'Oregon, et le Centre d'ingénierie des installations navales et de guerre pedestre ont vu le jour (Adamson et al., 2022, 2020; Nickerson et al., 2020). Ces études se sont intéressées à plusieurs bases militaires américaines actives de 1950 à 2000 et impactées par l'utilisation d'AFFF afin d'y comprendre les facteurs impactant le devenir, le transport et la distribution des PFAS. Les volumes et la composition des mousses utilisées sur ces trois bases n'ont pas été documentés.

Enfin, en 2024, le département de sciences environnementales et le département d'hydrologie et des sciences de l'atmosphère de l'université d'Arizona, le département d'ingénierie civile et environnementale de l'école des mines du Colorado et le groupe d'ingénierie Jacobs ont publié une étude visant à caractériser la distribution verticale des PFAS dans la zone non saturée d'un site impacté par l'utilisation d'AFFF (Bigler et al., 2024). Le site investigué est une zone d'entraînement à la lutte contre les incendies d'une base militaire utilisée de 1968 aux années 1990s. La nature et les volumes d'AFFF utilisés sur le site ne sont pas mentionnés.

La méthodologie utilisée dans ces différentes études est résumée dans le Tableau 12.

Tab. 12 : Stratégie appliquée à l'étude de plusieurs zones d'entraînement à la lutte contre les incendies aux Etats Unis (Adamson et al., 2022; Anderson et al., 2016; Houtz et al., 2013; Nickerson et al., 2020).

Persistence et dégradation des précurseurs sur un site d'entraînement à la lutte contre les incendies d'une base aérienne (Houtz et al., 2013)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Sols	
Substances ciblées	20 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans plusieurs formulations d'AFFF : C ₄ -C ₁₀ PFCAs, C ₄ , C ₆ -C ₈ PFSA, FOSA, 6:2, 8:2 FTSA, 6:2 FtTAoS, 6:2 FtTsaAm, 5:1:2, 5:3, 7:1:2, 7:3, 9:1:2 FTB, C ₄ -C ₆ PFSA, C ₄ -C ₆ PFSA.		20 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans plusieurs formulations d'AFFF : 6:2, 8:2 FTSA, FOSA, C ₄ -C ₉ PFCAs, C ₄ , C ₆ , C ₈ , C ₁₀ PFSA, PFBSAm, PFBSAmA, PFPeSAmA, PFHxSAm, PFHxSAmA, 6:2, 8:2 FtTAoS.	
Analyse TOP	Recherche de précurseurs non identifiés		Recherche de précurseurs non identifiés	
Stratégie d'échantillonnage	22 eaux prélevées dans des piézomètres permanents et temporaires entre 2 et 8 m de profondeur entre 600 et 1200 m de la zone d'entraînement.		16 sols prélevés à 0,6 m de profondeur et 10 sols prélevés dans la zone saturée entre 5 et 6 m entre 600 et 1200m de la zone d'entraînement.	
Méthodes de prélèvement	Stockée à 4°C.		Stockée à 4°C.	
Préparation des échantillons	Ajout de méthanol + centrifugation Pour le TOP : persulfate de potassium + NaOH		Extraction solide-liquide (hydroxyde d'ammonium + méthanol, ultrasonication, centrifugation) Estimation du TOP : persulfate de potassium + NaOH	
Analyse et quantification	LC-MS/MS Estimation du TOP		LC-MS/MS Estimation du TOP	
Limites de quantification	0,1 à 0,5 µg/L		0,4 à 3,0 µg/kg	
Présence de PFAS sur 10 installations actives de l'USAF utilisant des AFFF à travers les Etats Unis (Anderson et al., 2016)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines	Eaux de surface	Sols	Sédiments
Substances ciblées	16 PFAS ciblés : C ₄ -C ₁₄ PFCAs, C ₄ , C ₆ , C ₈ , C ₁₀ PFSA, et PFOSA			
Stratégie d'échantillonnage	59 échantillons prélevés au toit de la nappe phréatique.	36 échantillons prélevés dans des canaux d'eaux pluviales aménagés, des étangs et des cours d'eau naturels aux endroits où le modèle conceptuel du site indiquait une connexion hydraulique entre les eaux souterraines et de surface.	112 échantillons de subsurface prélevés à plusieurs intervalles de profondeur (de la surface au toit de la nappe) dans chaque forage DPT. 100 échantillons de sols de surface (0-30 cm) prélevés à différents endroits du site.	40 sédiments prélevés en surface (0-30cm) dans les canaux d'eaux pluviales aménagés, les étangs et les cours d'eau naturels échantillonnés.
Méthodes de prélèvement	Forage à l'aide de la technologie de poussée directe (DPT) + pompage. Placés dans des conteneurs PEHD.	Echantillons placés dans des conteneurs PEHD	Echantillons placés dans des conteneurs PEHD	Echantillons placés dans des conteneurs PEHD
Préparation des échantillons	Extraction en phase solide. Méthode 537 de l'USEPA modifiée (SOPs DV-LC-0012).		Extraction solide-liquide (hydroxyde de sodium +méthanol, ultrasonication, centrifugation). Méthode 537 de l'USEPA modifiée (SOPs DV-LC-0019)	
Analyse et quantification	Quantification : standards internes LC-MS/MS		Quantification : standards internes LC-MS/MS	
Limites de quantification	0.003 à 0.018 µg/L	0.003 à 0.017 µg/L	0.10 à 0.75 µg/kg	0.17 à 1.2 µg/kg
Site d'entraînement à la lutte contre les incendies d'une base militaire (Nickerson et al., 2020)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Sols	
Substances ciblées	28 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans certaines AFFF : C ₄ -C ₁₃ PFCAs, C ₄ -C ₁₁ PFSA, 4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, FOSA, MeFOSA, EtFOSA et Cl-PFOS.		24 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans certaines AFFF : C ₄ -C ₁₀ PFCAs, C ₃ -C ₉ PFSA, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, FOSA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, 5:3, 6:2, FTCAs, 6:2 FTUCA.	
Analyse non ciblée	Recherche de dizaine d'autres PFAS pour lesquels il n'existe pas de standards analytiques sur la base de l'analyse d'une mousse AFFF (Capstone 1157®).		Recherche de dizaine d'autres PFAS pour lesquels il n'existe pas de standards analytiques sur la base de l'analyse d'une mousse AFFF (Capstone 1157®).	
Stratégie d'échantillonnage	58 échantillons prélevés sur des emplacements adjacents aux sites de carottage.		105 échantillons prélevés tous les 10 cm sur des carottes forées sur l'ancienne fosse d'essais, la zone au nord-est de la fosse dans la direction générale de l'écoulement des eaux souterraines, et la zone en amont du site.	
Méthodes de prélèvement	Echantillonnage lors des forages à poussée directe et/ou dans des piézomètres temporaires installés à des profondeurs ciblées (jusqu'à 4 par site).		Appareil à poussée directe (modèle 6620DT) permettant de prélever des carottes de 4,7 cm de diamètre et de 1,5 m de long.	
Préparation des échantillons	Echantillons conservés à -20°C, extraction liquide-liquide (chlorure de sodium, acide chlorhydrique, acétate d'éthyle, 2,2,2-trifluoroéthanol + centrifugation).		Echantillons conservés à -20°C, puis lyophilisés et tamisés (2 mm), extraction solide-liquide (hydroxyde d'ammonium +méthanol), extraction en phase solide (ENVI-Carb)	
Analyse et quantification	Quantification : standards internes LC-MS/MS		Quantification : standards internes LC-HRMS	
Limites de quantification	n.c.		n.c.	
Zones de stockage, et de transfert d'AFFF (Adamson et al., 2022)				
Matrices échantillonnées	Eaux souterraines		Sols	
Substances ciblées	28 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans certaines AFFF : C ₄ -C ₁₃ PFCAs, C ₄ -C ₁₁ PFSA, 4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, FOSA, MeFOSA, EtFOSA et Cl-PFOS.		24 PFAS ciblés sur la base des substances identifiées dans certaines AFFF : C ₄ -C ₁₀ PFCAs, C ₃ -C ₉ PFSA, 4:2, 6:2, 8:2 FTSA, FOSA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, 5:3, 6:2, FTCAs, 6:2 FTUCA.	
Analyse non ciblée	Recherche de dizaine d'autres PFAS pour lesquels il n'existe pas de standards analytiques sur la base de l'analyse d'une mousse AFFF (Capstone 1157®).		Recherche de dizaine d'autres PFAS pour lesquels il n'existe pas de standards analytiques sur la base de l'analyse d'une mousse AFFF (Capstone 1157®).	

Stratégie d'échantillonnage	87 échantillons prélevés le long d'un transect suivant la direction de l'écoulement des eaux souterraines et plusieurs transects transversaux.	159 sols prélevés tous les 10 cm sur des carottes forées le long d'un transect suivant la direction de l'écoulement des eaux souterraines et plusieurs transects transversaux.
Méthodes de prélèvement	Prélevés à 4 profondeurs durant les forages à poussée directe + pompage dans les piézomètres existants.	Appareil à poussée directe (modèle 6620DT) permettant de prélever des carottes de 4,7 cm de diamètre et de 1,5 m de long.
Préparation des échantillons	Echantillons conservés à -20°C, extraction liquide-liquide (chlorure de sodium, acide chlorhydrique, acétate d'éthyle, 2,2,2-trifluoroéthanol + centrifugation).	Echantillons conservés à -20°C, puis lyophilisés et tamisés (2 mm), extraction solide-liquide (hydroxyde d'ammonium + méthanol), extraction en phase solide (ENVI-Carb).
Analyse et quantification	Quantification : standards internes LC-HRMS	Quantification : standards internes LC-HRMS
Limites de quantification	n.c.	n.c.
Site d'entraînement à la lutte contre les incendies d'une base militaire (Bigler et al., 2024)		
Matrices échantillonnées	Sols	
Substances ciblées	48 PFAS : C ₄ -C ₁₄ , C ₁₆ , C ₁₈ PFCAs, C ₃ -C ₁₂ PFSA, Cl-PFOS, Cl-O-PFNS, Cl-O-PFUndS, FBSA, FHxSA, FOSA, MeFOSA, EtFOSA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, 4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, 3:3, 5:3, 7:3, 6:2, 8:2, 10:2 FTCA, 6:2, 8:2, 10:2 FTUCA, ADONA, PFEICHxS, HPFO-DA.	
Stratégie d'échantillonnage	Trois forages de différentes profondeurs (de 1,5, 10 et 100 m) ont été forés sur le site et échantillonnés à des intervalles de profondeur réguliers (respectivement tous les 7,6 cm, 0,6 m, 0,3 m de profondeur). Echantillons composites.	
Méthodes de prélèvement	Carotte de 1000 m prélevée à l'aide d'un appareil de forage rotatif à air comprimé. Carotte de 10m prélevée par un échantillonneur à pression directe (split-spoon), Carotte de 1.5 m prélevée à l'aide d'un cylindre enfoncée dans le sol.	
Préparation des échantillons	Les sols ont été séchés à l'air et homogénéisés à l'aide d'un mortier et d'un pilon et tamisés à 2 mm. Stockage à -20°C. extraction solide-liquide (hydroxyde d'ammonium + méthanol), extraction en phase solide (ENVI-Carb)	
Analyse et quantification	Quantification : standards internes LC-HRMS	
Limites de quantification	n.c.	

n.c. : non communiqué

2.10.2. Principaux résultats

Parmi les PFAS recherchés, le PFOS et le PFHxS sont généralement les plus abondants sur l'ensemble des sites et des matrices étudiées. Le PFOA, le PFBS, le 6:2 FTSA, le PFHpA, le PFHxA et le PFNA sont également souvent très présents. La \sum_{PFAS} identifiés peut atteindre jusqu'à 30 mg/kg dans les sols et 51,4 mg/L dans les eaux souterraines au droit des sites. Sans surprise, les concentrations diminuent de plusieurs ordres de grandeur en s'éloignant des sites, indiquant une atténuation le long des voies d'écoulement.

Les fréquences de détection et les concentrations en PFAS ciblés sont logiquement plus élevées pour les sites où les volumes de mousses utilisés sont supposément plus importants (ex : sites d'essais et de maintenance des pompiers, hangars et bâtiments de stockage), et considérablement plus faibles sur le site où il n'y a eu qu'un seul rejet d' AFFF (utilisation d'urgence). Les concentrations en PFAS sont très variables entre et sur les sites et reflètent les conditions spécifiques et les pratiques opérationnelles propres à chacune des installations (Anderson et al., 2016).

Ces études mettent également en évidence des augmentations locales des teneurs en PFAS du sol au niveau de certains horizons de sol avec la baisse du pH, l'augmentation des teneurs en matières organiques, en argile, en calcite, ou de la salinité (semblent augmenter la capacité de sorption/rétention des sols et retarder la migration des PFAS vers les nappes phréatiques (Adamson et al., 2022). D'autre part, les travaux de Bigler et al. (2024) montrent que les propriétés tensioactives des PFAS leur permettent d'abaisser la tension de surface de l'eau et de se sorber à l'interface air/eau dans la porosité du sol. Ils observent alors une augmentation de la capacité de rétention des PFAS du sol dans la zone non saturée avec la baisse de la teneur en eau et l'augmentation de la surface de l'interface air/eau du sol.

Les produits de transformation issus de la dégradation des précurseurs présents dans les AFFF peuvent être plus mobiles, élargissant ainsi les panaches de PFAS avec le temps. Cependant, malgré le fait qu'ils représentent entre 41 % et 100 % des PFAS dans les formulations des AFFF produits aux USA (Houtz et al., 2013), ces précurseurs sont largement absents des eaux souterraines étudiées, probablement transformés en PFCAs et PFSA à chaînes plus courtes. Au contraire, des substances non présentes dans la plupart des formulations d'AFFF connues mais probablement issues de la dégradation des précurseurs qui s'y trouvent ont été retrouvées

dans les sols et les eaux souterraines (ex : le perfluorohexanesulfonamide, FHxSA). Ainsi, des dizaines de substances qui ne font pas partie des PFAS habituellement recherchés peuvent être présentes sur les sites d'utilisation d'AFFF. Ainsi, les profils de distribution des PFAS sur les sites varient largement avec l'éloignement à la source et la profondeur, en raison d'une diminution de la concentration des précurseurs et de l'augmentation de la proportion des produits de dégradation. Ces travaux soulignent donc l'importance d'élargir la gamme des substances à chercher dans les différentes matrices en fonction de la composition des mousses utilisées et leurs produits de dégradation.

L'étude haute résolution de la distribution et de la lixiviation des PFAS à travers la zone non saturée du site impacté par l'AFFF en Arizona montre que les PFAS à chaînes les plus longues ($\geq C_{10}$), très peu mobiles et peu lixiviables sont retenus dans les premiers 30 cm du sol (Bigler et al., 2024). Inversement, les PFAS à chaînes les plus courtes ($\leq C_6$) voient leur teneur augmenter fortement à partir de 80 cm de profondeur, s'accumulant à la limite de la zone d'infiltration. Quant aux PFAS à chaînes intermédiaires, ils sont répartis sur toute la longueur du profil avec des teneurs maximales atteintes entre 60 et 140 cm de profondeur. Ainsi, sur ce site, la teneur en PFAS totale augmente considérablement avec la profondeur pour atteindre son maximum entre 100 et 140 cm de profondeur.

Enfin, les sites de formation à la lutte contre les incendies sont souvent marqués par des solvants et des hydrocarbures halogénés. Certaines activités d'assainissement (ex : oxydation chimique in situ) visant ces co-contaminants peuvent alors accélérer la dégradation des précurseurs et la formation de PFCAs et PFSAs.

2.11. CANADA

2.11.1. Contexte et méthodologie

En 2021, une étude visant à caractériser la pollution au PFAS de quatre aéroports civils canadiens impactés par l'utilisation d'AFFF et à proposer une méthodologie de surveillance de ces sites a été publiée par le département de génie civil de l'Université de McGill et le département de chimie de l'Université de Montréal (Liu et al., 2021). 93 classes de PFAS ont été recherchées dans les eaux des sites actifs entre 1975 et 2005. Le volume, la fréquence des entraînements et la composition des AFFF utilisées sur ces périodes n'ont pas été communiqués. Les méthodologies utilisées pour l'échantillonnage et l'analyse sont résumées dans le Tableau 13.

Tab. 13 : Stratégie appliquée à l'étude de plusieurs zones d'entraînement à la lutte contre les incendies d'aéroports civils canadiens (Liu et al., 2021).

Matrices échantillonnées	Eaux souterraines	Sols
Substances ciblées	25 ciblés : 6:2, 8:2 FTSA, FBSA, FHxSA, PFOS, FPeSA, 6:2 FtTAoS -SO, PFHxS, FPrSA, 6:2 FtTAoS-SO ₂ , PFHxA, PFPeA, MeFBSAA, PFOA, PFBA, PFHpA, N-CMAmP-FHxSA, N-SPAmP-FHxSA, 8:2 FtTAoS -SO ₂ , 4:2 FTSaAm, PFPeS, N-TamP-N-MeFBSA, AmPr-FHxSAP, N-SP-FHxSA, PFHpS.	25 ciblés : PFOS, 7:1:2, 5:1:2, 7:3, 5:3, 9:1:2, 11:1:2 FTB, 6:2 FTAB, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, 6 :2 dimethyl FTSaAm, N-TamP-FHxSA, PFHxS, 6:2 FTSHA-SO, N-HOEAmP-FHxSA, PFHpS, PFHxA, PFNS, 6:2 FTSaAm, N-CMAmP-FBSAP, AmPr-FHxSA, 8:2 FTSO2PA, N-CMAmP-FHxSA.
Analyse non ciblée	Recherche de PFAS précédemment identifiés dans les formulations d'AFFF et les sites impactés par l'AFFF ou des sources industrielles.	Recherche de PFAS précédemment identifiés dans les formulations d'AFFF et les sites impactés par l'AFFF ou des sources industrielles.
Stratégie d'échantillonnage	65 eaux prélevées dans des piézomètres dans les zones situées en amont, sur et à proximité et en aval des sites.	45 sols de surface (0,15 à 0,3 m) et 37 de subsurface (0,4-8,8 m) prélevés dans les zones situées en amont, à proximité et en aval des sites, ou dans les zones à proximité non impactées par les activités d'aménagement ou d'assainissement qui ont eu lieu sur les sites.
Méthodes de prélèvement	Purge des piézomètres en utilisant des tubes PEHD et des pompes péristaltiques. Échantillons placés dans des bouteilles en PEHD. Stockés à 4°C.	Conteneurs : PEHD. Congelés à -20°C.

Préparation des échantillons	Extraction (centrifugation, méthanol) Pour le dosage des précurseurs oxydables totaux (TOP) : extraction (Méthanol + acide chloridrique, ultrasonication, centrifugation), puis ajout de persulfate de potassium et de NaOH à 85°C.	Séchage à l'air, homogénéisation, tamisage (2 mm), lyophilisation. Extraction solide-liquide (méthanol + acétate d'ammonium, ultrasonication, centrifugation). Pour le dosage des précurseurs oxydables totaux (TOP) : extraction (Méthanol + NaOH + acide chloridrique, ultrasonication, centrifugation), puis ajout de persulfate de potassium à 85°C.
Analyse et quantification	Quantification : standards internes LC-HRMS Estimation du TOP	
Limites de quantification	0,084 à 0,840 µg/L	0,05 à 0,4 µg/kg

2.11.2. Principaux résultats

L'étude montre une forte pollution des sols et des eaux souterraines par les PFAS sur les quatre sites ($\sum_{25\text{-PFAS}}$ max : 10,8 ? mg/L dans les eaux souterraines et 9,2 mg/kg dans les sols). Jusqu'à 212 PFAS appartenant à 66 classes distinctes de PFAS ont été identifiés dans les sols à proximité des sites d'entraînement. Jusqu'à 177 PFAS appartenant à 58 classes distinctes de PFAS ont été détectés dans les eaux souterraines.

La signature chimique en PFAS varie d'un site à l'autre probablement en raison des différentes formulations et volumes d'AFFF utilisés sur chacun des sites. Parmi les 25 PFAS quantifiés, les teneurs en PFCAs et PFSA sont particulièrement importantes probablement en raison de la dégradation des précurseurs. Le TOP a effectivement révélé des teneurs / concentrations relativement élevées de précurseurs totaux dans les sols et les eaux souterraines des sites qui contribuent, par leur dégradation à la production de PFCAs et PFSA de différentes longueurs de chaînes carbonées. Ces résultats révèlent que la teneur en PFAS du sol pourrait avoir été largement sous-estimée dans les précédentes études axées sur la recherche d'un nombre limité de PFAS. Un nombre important des PFAS découverts en abondance dans les sols et les eaux souterraines de cette étude ne font pas l'objet d'une surveillance en routine, tandis que certains PFAS couramment ciblés sont peu pertinents pour les sites d'utilisation d'AFFF. Ainsi cette étude recommande de suivre sur les sites d'utilisation d'AFFF :

- le 6:2, 8:2 FTSA, FBSA, FHxSA, PFOS, FPeSA, 6:2 FtTAoS -SO, PFHxS, FPrSA, 6:2 FtTAoS -SO₂, PFHxA, PFPeA, MeFBSAA, PFOA, PFBA, PFHpA, N-CMAMP-FHxSA, N-SPAMP-FHxSA, 8:2 FtTAoS-SO₂, 4:2 FTSaAm, PFPeS, N-TamP-N-MeFBSA, AmPr-FHxSAP, N-SP-FHxSA, PFHpS dans les eaux souterraines ;
- le PFOS, 7:1:2, 5:1:2, 7:3, 5:3, 9:1:2, 11:1:2 FTB, 6:2 FTAB, 6:2, 8:2, 10:2 FTSA, 6 :2 dimethyl FTSaAm, N-TamP-FHxSA, PFHxS, 6:2 FTSHA-SO, N-HOEAMP-FHxSA, PFHpS, PFHxA, PFNS, 6:2 FTSaAm, N-CMAMP-FBSAP, AmPr-FHxSA, 8:2 FTSO₂PA, N-CMAMP-FHxSA dans les sols.

Le PFOS et le PFHxS sont prédominants dans les sols et les eaux souterraines. Les FTB ont été mesurés en grandes concentrations sur les sites encore actifs, indiquant que les formulations d'AFFF utilisées sur les sites au moment de l'étude reposeraient sur ce nouveau type de chimie. La toxicité et le devenir dans l'environnement des FTB restent cependant largement inexplorés.

3. Synthèse des méthodologies de diagnostic des sites pollués par l'utilisation d'AFFF

3.1. COMPORTEMENT GENERAL DES PFAS

Les travaux présentés dans ce rapport montrent que l'utilisation d'AFFF a engendré sur l'ensemble des sites investigués et leur voisinage une pollution importante des sols, des eaux souterraines et parfois des eaux de surface et des sédiments avec des teneurs / concentrations pouvant atteindre plusieurs dizaines de mg/kg ou de mg/L (cf. Tableau 14, Annexe 1). Les sols et les eaux souterraines sont les matrices généralement les plus investiguées sur les sites d'utilisation d'AFFF. Ce sont d'ailleurs ces matrices qui présentent les teneurs en PFAS les plus importantes (cf. Tableau 14). Cependant, les PFAS peuvent atteindre les eaux de surface et s'accumuler dans les sédiments et les organismes aquatiques. Ainsi selon les conditions et le contexte des sites investigués, une attention particulière pourra également être portée à l'étude des cours d'eau situés sur, en aval des sites ou en connexion hydraulique avec la nappe phréatique contaminée.

Tab. 14 : Nombre total d'échantillons analysés et concentration totale en PFAS mesurée dans les 20 études présentées.

Milieus investigués	Eaux souterraines	Eaux de surface	Sols	Sédiments
Nombre d'échantillon total analysé dans les études disponibles	731	213	2 037	71
∑ PFAS maximale mesurée (de 3 à 41 PFAS)	4.10 ⁻³ à 51,4 mg/L	0,12 à 73,3 µg/L	3,24 à 357 mg/kg	14,6 à 508 µg/kg

Ces résultats permettent de proposer un schéma conceptuel de transfert et d'exposition générique du comportement des PFAS sur et à proximité des sites d'utilisation d'AFFF (cf. Figure 4).

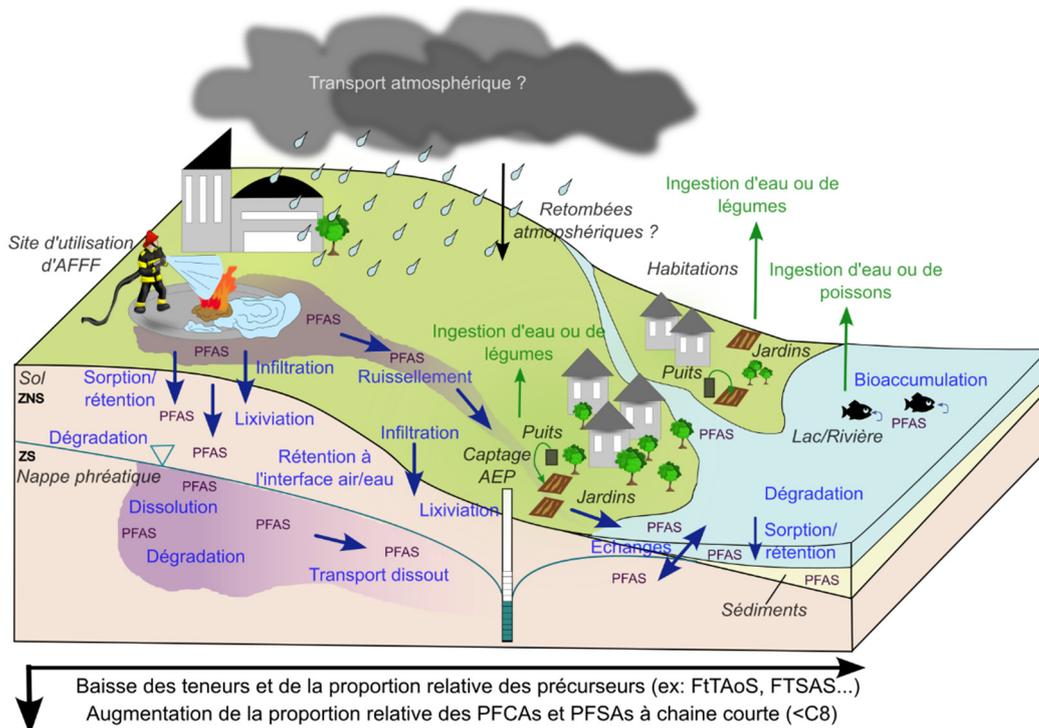


Figure 4 : Schéma conceptuel montrant les principales voies de transfert et le comportement général des PFAS identifiés sur les sites d'utilisation d'AFFF.

Ces études montrent que le comportement des PFAS après leur rejet sur les sites AFFF est complexe. Les études disponibles montrent l'aptitude générale des PFAS contenus dans les émulseurs à s'infiltrer dans les sols sur plusieurs mètres jusqu'à atteindre la nappe phréatique. En surface du sol, lors de leur utilisation, les AFFF peuvent être projetées sur une dizaine de mètres. Poussées par les vents, ces mousses peuvent être propulsées jusqu'à 40 m de la zone d'utilisation. Par ruissellement, les effluents peuvent alors atteindre et impacter les eaux de surface (rivières, lac, ruisseaux, fossés, mer) et les réseaux d'eaux usées en aval du site. Les PFAS à chaînes longues peuvent alors s'accumuler fortement dans les sédiments, et les organismes vivants (ex : poissons, fruits de mer). L'arrosage des cultures avec l'eau des forages/puits marqués, et les inondations occasionnelles des drains provenant des sites après de fortes pluies peuvent entraîner de nouvelles pollutions du sol dans les environs du site et une accumulation de PFAS dans les plantes et les légumes.

De plus, cet état des lieux montre que le comportement des PFAS est spécifique à chaque site puisqu'il dépend :

- **des substances** et donc de la composition des émulseurs utilisés **et de l'âge de la pollution** (dégradation/transformation progressive des précurseurs en PFAS à chaînes de plus en plus courtes le long des voies de transfert). Les PFAS à chaînes longues ($\geq C_8$) (ex : PFOS) peuvent se sorber et s'accumuler fortement dans les sols pendant plusieurs dizaines d'années. En raison de leur forte capacité de sorption dans les sols, les PFAS à chaînes longues sont donc retrouvés généralement à de faibles profondeurs, d'autant plus si la pollution est récente et que ces substances ne se sont pas encore dégradées en PFAS à chaînes courtes (exemple, cf. Figure 5).

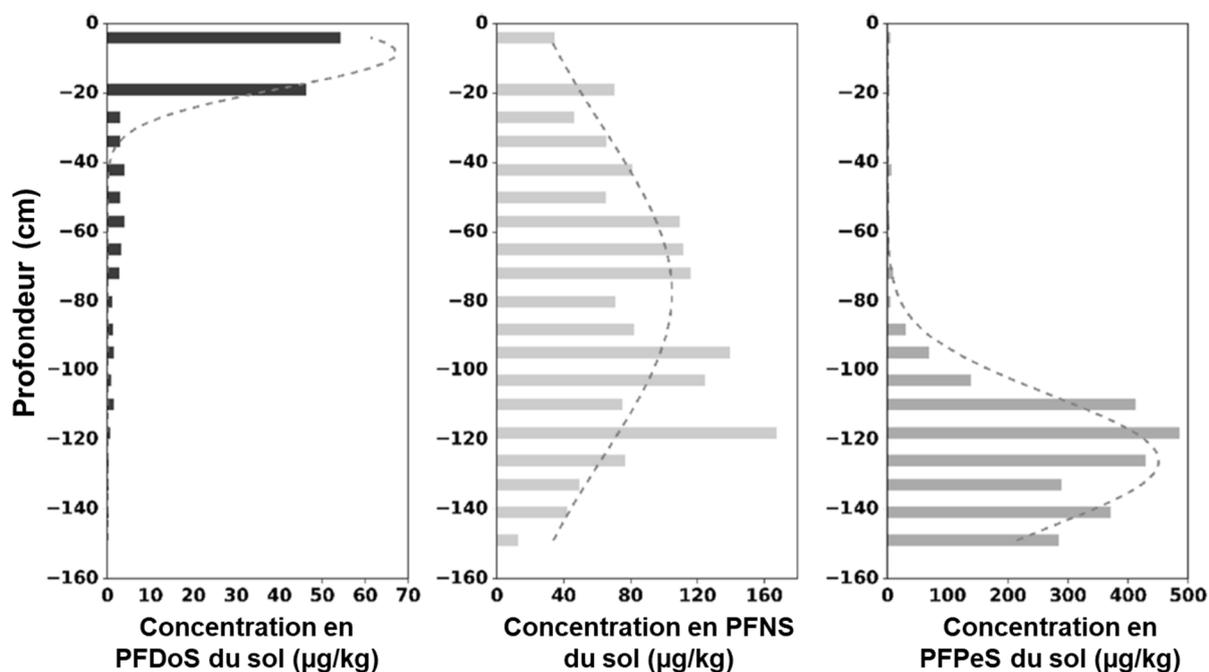


Figure 5 : Evolution des teneurs de trois PFAS de différentes longueurs de chaîne carbonée dans des carottes de sol prélevées sur un site impacté par l'utilisation d'AFFF (traduit d'après Bigler et al., 2024).

Au contraire, les PFAS à chaînes courtes ($\leq C_6$), mobiles solubles et lixiviables, migrent plus facilement et rapidement à travers la zone non saturée. Ils sont donc susceptibles d'être retrouvés plus loin de la source, plus en profondeur dans le sol et en phase aqueuse (nappe phréatique) (Bigler et al., 2024). Il a également été démontré que la capacité des PFAS à être retenus dans les sols est aussi influencée par la structure moléculaire des PFAS et notamment par la présence de groupements fonctionnels. Ainsi, les PFCAs et leur groupement carboxylique semblent être plus facilement lixiviables que les PFSA et les PFOSA. Cela souligne l'importance de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs lors du diagnostic et l'évaluation des risques sur les sites AFFF (ITRC, 2024) ;

- **de la teneur en eau du sol et donc des conditions climatiques et environnementales.** Il a été démontré que plus le taux de recharge en eau du sol augmente, plus le temps de transit des PFAS dans les sols sont courts (Guo et al., 2020). Les PFAS sont dotés d'une tête hydrophile (ex: groupements fonctionnels acides) en plus de leur chaîne fluorée hydrophobe. Ainsi, ces propriétés tensioactives leur permettent d'abaisser la tension de surface de l'eau et de s'accumuler et se sorber à l'interface air/eau. Ainsi, si la teneur en eau du sol baisse, la surface de l'interface air/eau du sol augmente, favorisant l'adsorption et la rétention des PFAS à cette interface, réduisant de fait leur capacité de migration à travers la zone non saturée (Bigler et al., 2024; Brusseau and Guo, 2022; ITRC, 2024). Ce phénomène est d'autant plus marqué que la longueur de la chaîne carbonée des PFAS augmente (Brusseau, 2019) ;
- **de la composition et des propriétés physico-chimiques du sol** (salinité, teneur en argile, en matière organique, en calcite). De récents travaux ont montré qu'en conditions expérimentales, des variations du pH du sol et de salinité peuvent influencer la capacité du sol à retenir les PFAS (Kabiri et al., 2023, 2022; Nickerson et al., 2023; Richardson et al., 2022). Ainsi des conditions plus alcalines semblent favoriser la désorption et la lixiviation des PFAS des sols pollués par des AFFF. D'autre part, il a été démontré que l'augmentation de la teneur en argiles et en matières organiques du sol favorisent la sorption et la rétention des PFAS dans le sols (Adamson et al., 2022; Høisæter et al., 2019). Ce phénomène est d'autant plus marqué que la longueur de chaîne carbonée des PFAS est longue. La présence d'horizons calciques et donc l'augmentation de la teneur en carbonate de calcium du sol semble

également augmenter la surface spécifique du sol, augmentant le potentiel de sorption du sol (Bigler et al., 2024). La présence de calcite semble aussi accroître la surface de l'interface air/eau dans la porosité du sol, favorisant également la rétention des PFAS par adsorption sur ces interfaces. De manière générale, pour une même teneur en eau du sol, la surface de l'interface air/eau augmente avec la diminution de la taille des grains du sol. Ainsi les sols les plus fins (ex : sols argileux) auront une plus grande capacité de rétention des PFAS par adsorption à l'interface air/eau dans la zone non saturée. Des variations de **la composition et des propriétés physico-chimiques du sol avec la profondeur sur un même site peut donc entraîner des variations significatives des teneurs en PFAS du sol ;**

- **la présence de co-contaminants** parfois présents aux côtés des PFAS sur les sites d'utilisation d'AFFF comme les NAPLs. La présence de NAPLs semble effectivement affecter la rétention et le transport des PFAS (Liao et al., 2022; Liu et al., 2024; Van Glubt and Brusseu, 2021). Ces effets semblent néanmoins complexes et restent encore mal compris.

Une fois **dans la nappe**, ces substances peuvent former un panache capable de migrer et d'atteindre les ouvrages d'alimentation en eau potable (AEP) situés plus en aval selon le sens d'écoulement. Durant leur transfert, les précurseurs polyfluorés (ex : FTSA, FTAB, FtTAoS etc.) pourront être dégradés par voies aérobies ou anaérobies et ainsi être transformés en PFCAs et PFSAs, plus persistants et mobiles (ITRC, 2024; RECORD, 2024). C'est la raison pour laquelle il n'existe pas toujours de lien direct entre les substances identifiées dans les eaux souterraines et de surface (et parfois les sols) plusieurs années après l'utilisation de mousse et les substances initialement présentes dans les mousses pour les études présentées dans ce rapport.

Les études disponibles montrent que la nature, la distribution et les concentrations / teneurs en PFAS dans les eaux souterraines, les sols et les sédiments peuvent également fortement varier d'un site à l'autre en fonction de :

- **la viscosité** de la mousse utilisée (influence la capacité et les vitesses d'infiltration de la mousse dans les sols, la capacité des substances être retenues dans les sols ou à atteindre les eaux souterraines et de surface) ;
- l'inclinaison du terrain, du matériel utilisé pour l'épandage, et des conditions climatiques au moment de l'utilisation (influencent la distance de propulsion de la mousse, les vitesses de ruissellement) ;
- **les infrastructures** sur le site (la présence d'une dalle et parfois de systèmes de drainage peut limiter les rejets) ;
- **des volumes, fréquences et durées d'utilisation des AFFF** (Anderson et al., 2016; RECORD, 2024). L'étude menée sur un site d'utilisation d'AFFF Norvégien montre par exemple que dans les zones faiblement impactées par l'utilisation d'AFFF, la teneur en PFOS (le PFAS majoritaire sur le site) atteignait son maximum dans les 30 premiers cm du sol (Høisæter et al., 2019). Cependant, sur les zones les plus fortement impactées, le plus fort de la pollution se concentre dans les 3 premiers mètres du sol, avec des maximums atteints entre 1 et 3 m de profondeur.

Ainsi il n'est pas possible d'émettre un schéma conceptuel plus détaillé et précis du comportement des PFAS sur les sites AFFF car chaque PFAS aura un comportement qui lui sera propre en fonction de sa structure, de sa longueur de chaîne carbonée et des propriétés du site. **Il conviendra donc de prendre en considération ces paramètres au cas par cas afin d'identifier les voies de transport et d'exposition pertinentes pour chaque site et chaque substance.**

3.2. QUELLES SUBSTANCES RECHERCHER ?

La synthèse de ces études nous montre que jusqu'à 84 substances ont été recherchées sur les sites d'utilisation de mousses AFFF (cf. Tableau 15). Les études présentées dans ce rapport montrent que les substances identifiées sur les sites ne sont pas toujours les substances directement contenues dans les émulseurs utilisés mais sont parfois issues de leur transformation dans l'environnement (Houtz et al., 2013). Il ne s'agit donc pas de rechercher sur les sites les centaines de substances qui rentrent dans la composition des émulseurs utilisés (si connus) mais bien d'identifier parmi celles-ci les produits de dégradation et les substances susceptibles de s'accumuler et de persister dans les différentes matrices environnementales (cf. Figure 4).

Parmi les familles de substances les plus présentes et recherchées sur les sites AFFF (en haut à droite des Figure 7A et 7B), citons : les PFCAs, les PFSA, les FTSA, les PFASAs, les FASEs, les FASAA, les PFOSis et les FTABs (Figure 6). Parmi ces familles, les PFAS présentant généralement les plus fortes concentrations / teneurs dans les eaux, les sols et les sédiments des sites AFFF (voir Annexe 1) sont : les C₄-C₁₄ PFCAs, les C₃-C₁₀ PFSA, le 4:2, 6:2 et 8:2 et 10:2 FTSA, le FHxSA, le FOSA, MeFOSA, l'EtFOSA, le FOSAA, le MeFOSAA le MeFOSE, l'EtFOSE, le CI-PFOS, le 6:2 FTSaAm, le PFOSi, le PFHxSi et le 6:2 FTAB. Les substances à rechercher sur les sites AFFF lors des diagnostics pourraient donc être sélectionnées parmi les substances listées ci-dessus. D'autres substances semblent néanmoins pouvoir être présentes sur les sites AFFF mais restent encore peu documentées en raison de la difficulté à les analyser (recherchées dans moins de 10% des études), comme des composants d'AFFF récemment découverts (ex : les FtTAoS, les FtTHN+) et d'autres produits et sous-produits de dégradation des AFFF (ex : les 6:2 et 10:2 FTCAs et FTUCAs, les FtTAoS-SO, les FTBs, les 8:2 et 10:2 FTABs, les FtTHN+-SO, les FTSaMs, les FTSaMAMs, les PFSaMs, et les PFSAMs, (cf. Tableau 15, Figure 6, en haut à gauche des Figures 7A, 7B, BRGM, 2024a; Choi et al., 2022; Gonda et al., 2023; Shaw et al., 2019; Weiner et al., 2013).

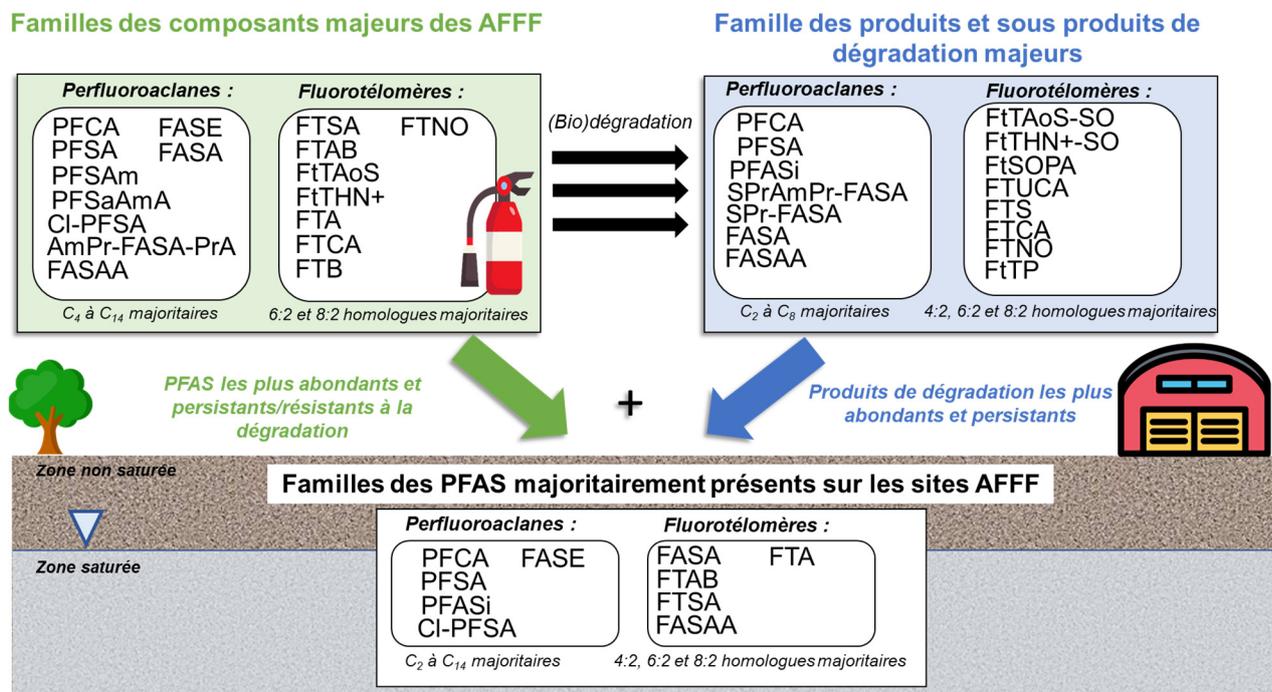


Figure 6 : Substances poly et perfluorées majoritairement rencontrées dans les émulseurs (BRGM, 2024a; Liu et al., 2022), leurs produits de dégradations (BRGM, 2024a, 2024b; Gonda et al., 2023; Yan et al., 2024) et sur les sites d'utilisation des AFFF (ce rapport).

Connaitre les formulations chimiques des émulseurs utilisés sur chaque site et leurs produits de transformation pourrait permettre de mieux cibler des substances à rechercher parmi cette liste dans chaque milieu sur les sites d'utilisation de mousses. Cependant, comme le montrent les études présentées dans ce rapport et les états des lieux à l'échelle européenne, la composition des émulseurs utilisés sur les sites est souvent difficile à obtenir (BRGM, 2024a). En France, les principaux émulseurs utilisés depuis 2012 sont listés dans le Tableau 15. Cette liste est non exhaustive et ne comprend pas les émulseurs utilisés avant 2012, date de l'interdiction d'utilisation du PFOS. Elle ne représente donc qu'une partie des émulseurs ayant pu être utilisés en France. Il est également important de noter que seuls les PFCAs et PFSA's présents dans ces AFFF ont été recherchés et quantifiés, pas les autres classes. Au vu des substances déjà identifiées sur les sites AFFF français (en bleu dans le Tableau 15), il est clair que d'autres PFAS ont été et sont contenus dans certains de ces émulseurs sans pour autant avoir été quantifiés. Par exemple, parmi les Fluorosurfactants utilisés dans la composition de ces émulseurs, on trouve le 6:2 FTNO (ou Capstone 1183, cf. Tableau 16) ou encore le Capstone 1470 (6:2 FTSAPr-AmHOPrS ou EtOH-Am-Pr-PFHxSAPrS, cf. Tableau 16), deux PFAS qui ne figurent pas dans les composants des émulseurs identifiés. A noter que la composition de ces émulseurs a pu varier au cours du temps en fonction de la réglementation. Les compositions présentées ici, en plus d'être parcellaires, ont donc pu changer sur la durée de la période de commercialisation. Des études complémentaires sur les émulseurs utilisés sur le territoire sont donc nécessaires.

Tab. 15 : Fréquences auxquelles les PFAS ont été recherchés (R) et quantifiés (Q) dans les différentes matrices des sites AFFF parmi les 23 publications étudiées. Les groupes (Grp.) indiqués pour chaque milieu correspondent aux groupes de la figure 7.

Substances	Abv.	CAS	C no	Classe	Eaux de surface et souterraines			Sols et sédiments			
					R (%)	Q (%)	Grp.	R (%)	Q (%)	Gr p.	
Acide perfluoropropanoïque	PFPrA	422-64-0	3	Acides carboxyliques poly et perfluorés (PFCAs)	5	100	1	6	100	1	
Acide perfluorobutanoïque	PFBA	375-22-4	4		70	100	10	58	94	8	
Acide perfluoropentanoïque	PFPeA	2706-90-3	5		70	100	10	65	95	8	
Acide perfluorohéxanoïque	PFHxA	307-24-4	6		90	100	11	90	100	10	
Acide perfluoroheptanoïque	PFHpA	375-85-9	7		85	100	11	87	100	10	
Acide perfluorooctanoïque	PFOA	335-67-1	8		95	100	11	97	100	10	
Acide perfluorononanoïque	PFNA	375-95-1	9		80	94	11	84	96	9	
Acide perfluorodécanoïque	PFDA	335-76-2	10		70	93	10	81	84	9	
Acide perfluoroundécanoïque	PFUnDA	2058-94-8	11		60	75	10	77	88	9	
Acide perfluorododécanoïque	PFDoDA	307-55-1	12		55	45	7	77	88	9	
Acide perfluorotridécanoïque	PFTrDA	72629-94-8	13		55	55	7	74	91	9	
Acide perfluorotétradécanoïque	PFTeDA	376-06-7	14		55	36	7	74	83	9	
Acide perfluorohéxadécanoïque	PFHxDA	67905-19-5	16		5	0	3	10	67	5	
Acide perfluorooctadécanoïque	PFODA	16517-11-6	18		15	33	4	16	60	5	
Perfluoroéthane sulfonate	PFEIS	354-88-1	2		Acides sulfoniques poly et perfluorés (PFSA's)	5	100	1	0	0	3
Perfluoropropane sulfonate	PFPrS	423-41-6	3			20	100	2	16	100	2
Perfluorobutane sulfonate	PFBS	375-73-5	4			85	100	11	87	96	10
Perfluoropentane sulfonate	PFPeS	2706-91-4	5			30	83	8	19	100	2
Perfluorohexane sulfonate	PFHxS	355-46-4	6	95		100	11	94	97	10	
Perfluoroheptane sulfonate	PFHpS	375-92-8	7	50		100	9	35	100	7	
Perfluorooctane sulfonate	PFOS	1763-23-1	8	100		100	11	100	100	10	
Perfluorononane sulfonate	PFNS	68259-12-1	9	30		83	8	19	83	6	
Perfluorodécane sulfonate	PFDS	335-77-3	10	65		85	10	77	92	9	
Perfluoroundécane sulfonate	PFUnDS	749786-16-1	11	0		0	3	6	100	1	
Perfluorododécane sulfonate	PFDoS	79780-39-5	12	20		50	5	16	80	6	
1H,1H,2H,2H-perfluorohexane sulfonate	4:2 FTSA	757124-72-4	6	Fluorotélomères sulfonates (FTSs, FTSA's)		45	100	9	29	78	6
1H,1H,2H,2H-perfluorooctane sulfonate	6:2 FTSA	27619-97-2	8		65	100	10	71	100	8	
1H,1H,2H,2H-perfluorodécane sulfonate	8:2 FTSA	39108-34-4	10		55	91	10	32	100	7	
1H,1H,2H,2H-perfluorododécane sulfonate	10:2 FTSA	120226-60-0	12		15	67	6	16	100	2	
Perfluorobutane sulfonamide	FBSA	30334-69-1	4	Perfluoroalcanes sulfonamides (PFASAs)	5	100	1	6	100	1	
Perfluorohexane sulfonamide	FHxSA	41997-13-1	6		15	100	2	10	100	1	
Perfluorooctane sulfonamide	FOSA	754-91-6	8		70	86	10	74	91	9	
N-Méthyl perfluorobutane sulfonamide	MeFBSA	68298-12-4	5		5	100	1	0	0	3	
N-Méthyl perfluorooctane sulfonamide	MeFOSA	31506-32-8	9		30	67	5	39	92	7	
N-Ethyl perfluorooctane sulfonamide	EtFOSA	4151-50-2	10		35	57	5	45	93	7	
Perfluoro-1-octane sulfonamido acétique acide	FOSAA	2806-24-8	10	Acides acétiques perfluoroalcanes sulfonamides (FASAA's)	30	67	5	16	100	2	
2-(N-Méthyl perfluorooctane sulfonamido) acétique acide	MeFOSAA	2355-31-9	11		20	75	6	19	100	2	
2-(N-Ethyl perfluorooctane sulfonamido) acétique acide	EtFOSAA	2991-50-6	12		25	60	5	19	67	5	
Chloro-perfluoroheptane sulfonate	Cl-PFOS	777011-38-8	8	Acides sulfoniques poly et perfluorés chlorés (Cl-PFSA's)	15	100	2	16	100	2	
Chloro-perfluorononane sulfonate	Cl-PFNS		9		0	0	3	10	0	3	
9-chloro-3-oxa-perfluorononane sulfonate	Cl-O-PFNS		9	Acides sulfoniques oxa poly et perfluorés chlorés (Cl-O-PFSA's)	0	0	3	6	100	1	
11-chloro-3-oxa-perfluoroundécane sulfonate	Cl-O-PFUnDS		10		0	0	3	6	100	1	
N-Méthyl-N-(2-hydroxyethyl) perfluorooctanesulfonamide	MeFOSE	24448-09-7	11	Perfluoroalcanes sulfonamides éthanols (FASE's)	5	100	1	23	100	2	
1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptadecafluoro-N-(2-hydroxy ethyl)-N-methyloctane-1- sulfonamide	EtFOSE	1691-99-2	12		5	100	1	23	100	2	

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

2H,2H,3H,3H-Perfluorohexanoïque acide	3:3 FTCA	356-02-5	6	Fluorotélomères d'acides carboxyliques (FTCAs)	0	0	3	6	100	1
2H,2H,3H,3H-Perfluorooctanoïque acide	5:3 FTCA	914637-49-3	8		20	33	4	6	100	1
2H,2H,3H,3H-Perfluorodecanoïque acide	7:3 FTCA	34598-33-9	10		0	0	3	6	100	1
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- tridecafluorooctanoïque acide	6:2 FTCA	53826-12-3	8		20	75	6	6	100	1
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,10,10,10- heptadecafluorodécanoïque acide	8:2 FTCA	27854-31-5	10		10	100	1	6	100	1
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11, 11,12,12,12- hénicosafuorodécanoïque acide	10:2 FTCA	53826-13-4	12		10	100	1	6	100	1
4:2 Fluorotélomère insaturé carboxylic acide	4:2 FTUCA	70887-90-0	6	Fluorotélomères d'acides carboxyliques insaturés (FTUCAs)	0	0	3	6	0	3
6:2 Fluorotélomère insaturé carboxylic acide	6:2 FTUCA	70887-88-6	8		15	67	6	16	80	6
8:2 Fluorotélomère insaturé carboxylic acide	8:2 FTUCA	70887-84-2	10		10	100	1	16	60	5
10:2 Fluorotélomère insaturé carboxylic acide	10:2 FTUCA	70887-94-4	12		10	100	1	6	100	1
4:2 Fluorotélomère sulfonamido propyl dimethyl amine	4 :2 FTSaAm		11	Fluorotélomères sulfonamides amides (FTAs ou FTSaAm)	5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère sulfonamido propyl dimethyl amine	6:2 FTSaAm	1383438-86-5	13		15	100	2	6	50	4
8:2 Fluorotélomère sulfonamido propyl dimethyl amine	8:2 FTSaAm		15		5	100	1	6	50	4
10:2 Fluorotélomère sulfonamido propyl dimethyl amine	10:2 FTSaAm		17		5	100	1	13	50	4
6 :2 Fluorotélomère thioéther amido-sulfonate	6:2 FITAoS	88992-47-6	15	Fluorotélomères thioéther amido-sulfonates (FITAoS ou FTSAS)	5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère thioéther amido-sulfonate sulfoxyde	6:2 FITAoS-SO		15	Fluorotélomères thioéther amido-sulfonates sulfoxydes (FITAoS-SO ou FTSAS-SO)	5	100	1	0	0	3
8:2 Fluorotélomère thioéther amido-sulfonate sulfoxyde	8:2 FITAoS-SO		17		5	100	1	0	0	3
Perfluorohexane sulfinate	PFHxSi	115416-67-6	6	Acides sulfoniques perfluoroalcanes (PFASis)	15	100	2	13	100	1
Perfluorooctane sulfinate	PFOSi	647-29-0	8		15	100	2	13	100	1
5:3 Fluorotélomère betaine	5:3 FTB	171184-14-8	12	Fluorotélomères bétaïnes (FTBs ou FIBs)	5	100	1	0	0	3
7:3 Fluorotélomère betaine	7:3 FTB	171184-15-9	14		5	100	1	0	0	3
9:3 Fluorotélomère betaine	9:3 FTB	171184-16-0	16		5	100	1	0	0	3
5:1:2 Fluorotélomère betaine	5:1:2 FTB	171184-02-4	12		5	100	1	0	0	3
7:1:2 Fluorotélomère betaine	7:1:2 FTB	171184-03-5	14		5	100	1	0	0	3
9:1:2 Fluorotélomère betaine	9:1:2 FTB	171184-04-6	16		5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère sulfonamide betaine	6:2 FTAB	34455-29-3	15	Fluorotélomères sulfonamides alkylbétaïnes (FTABs ou FTSABs)	30	100	8	6	100	1
8:2 Fluorotélomère sulfonamide betaine	8:2 FTAB	34455-24-5	17		5	100	1	0	0	3
10:2 Fluorotélomère sulfonamide betaine	10:2 FTAB	34455-35-1	19		5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère sulfonamide	6 :2 FTSaM		8	Fluorotélomères sulfonamides (FTSaM ou FTSa)	5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère sulfonamide propyl N methyl amine	6:2 FiSaMAM			Fluorotélomères sulfonamides propyl N méthyl amines (FiSaMAM)	5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère thio hydroxyle ammonium	6:2 FITHN+	88992-46-5	14	Fluorotélomères thio hydroxyles ammonium (FITHN+)	5	100	1	0	0	3
8:2 Fluorotélomère thio hydroxyle ammonium	8:2 FITHN+		16		5	100	1	0	0	3
6:2 Fluorotélomère thio hydroxyle ammonium sulfoxyde	6:2 FITHN+-SO		14	Fluorotélomères thio hydroxyles ammonium sulfoxydes (FITHN+-SO)	5	100	1	0	0	3
8:2 Fluorotélomère thio hydroxyle ammonium sulfoxyde	8:2 FITHN+-SO		16		5	100	1	0	0	3
Perfluorohexane sulfonamide amino carboxylates	PFHxSAMa	81190-41-2	14	Acides perfluoroalcanes sulfonamido amino carboxylates (PFSAMa)	5	100	1	0	0	3
Perfluorohexane sulfonamide amine	PFHxSAM	50598-28-2	11	Perfluoroalcanes sulfonamides amines (PFSaAm ou PFSAM)	5	100	1	0	0	3
Perfluorooctane sulfonamide amine	PFOSAM	13417-01-1	13		5	100	1	0	0	3
Perfluoro-4-éthylcyclohexane sulfonique acide	PFECHS	646-83-3	8	Acides sulfoniques poly et perfluorés alkyl éthers (PFESA)	0	0	3	6	100	1
Perfluoro(2-méthyl-3-oxahexanoic) acide	HPFO-DA, (GenX)	13252-13-6	6	Acides carboxyliques poly et perfluorés alkyl éthers (PFECA)	0	0	3	6	100	1

En bleu : les PFAS identifiés au moins une fois sur un site AFFF français

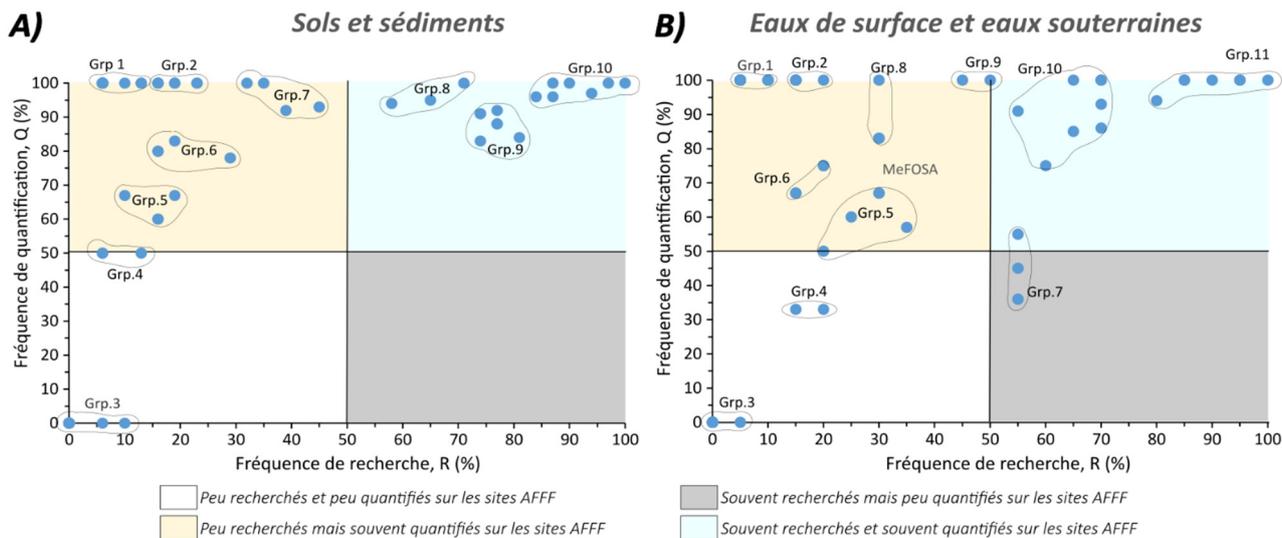


Figure 7 : Fréquence de quantification en fonction de la fréquence de recherche des PFAS dans les A) sols et sédiments et B) les eaux de surface et souterraines des sites AFFF. Les PFAS inclus dans chaque groupe sont précisés dans le Tableau 14 pour chacun des milieux.

Enfin, il est important de noter qu'en cas de pollutions multiples sur les sites AFFF (ex : autre source d'émission en PFAS que les AFFF sur un site), il sera difficile de discriminer la contribution de chacune des sources puisque la majorité des substances listées ci-dessus peuvent également être émises par d'autres activités (industries fluorochimiques, textiles, métallurgiques, papeteries etc.) ou être produits par la dégradation de PFAS utilisés par d'autres activités (BRGM, 2024a, 2024b). C'est par exemple le cas des PFCAs, des PFSAs, des FASAAs, des FASAs, des FTCAs, des FTUCAs, des FTSAs, ou encore des PFASis. Seules certaines substances semblent, à ce jour, relativement spécifiques à l'utilisation de mousses AFFF, citons : les Cl-PFSAs, les FTABs, les FTAs, les FTBs (fluorotélomères bétaïnes), les PFSaAms (Perfluoroalkyles Sulfonamides Amines), PFSAmAs (Perfluoroalkyles sulfonamides amino carboxylates), les FtTHNs (Fluorotélomères Thio Hydroxy Ammoniums) et les FtTAoS (Fluorotélomères thioéther amido-sulfonates). Développer les méthodes analytiques permettant d'inclure le suivi de ces substances semble donc essentiel pour permettre de caractériser au mieux les pollutions liées à l'utilisation d'AFFF.

Tab. 16 : Caractéristiques des émulseurs contenant des PFAS utilisés en France entre 2012 et aujourd'hui identifiés à l'heure actuelle (informations communiquées par les principaux fournisseurs).

Emulseurs	Autre nom	Période de commercialisation majeure	PFAS majeurs identifiés parmi les PFAS recherchés à ce jour dans la composition de l'émulseur (du plus abondant au moins abondant).	Fluorosurfactants utilisés dans la conception des émulseurs
TRIDOLC6 ICAO-C3%		2020-2022	PFHxA (62%), PFBA (29%), PFPeA (9%), PFHpA (<1%)	DX1030 (CAS 107-41-5)
Tridol S3 B	UNISERAL AF 12 S3	2013-2016	PFHxA (68%), PFBA (27%), PFPeA (5%)	DX1090
Tridol S6 B	UNISERAL AF 12 S6	2012-2019	PFHxA (62%), PFBA (29%), PFPeA (9%), PFHpA (<1%)	DX1080
Tridol S3		2012-2013	PFHxA (55%), PFBA (33%), PFPeA (12%)	FS 818-66
TridolC6 S3		2020	PFHxA (65%), PFBA (31%), PFPeA (4%)	FS 818-6
Emulseur TRIDOLC6 S3 LT		2021	PFHxA (62%), PFBA (30%), PFPeA (8%)	Capstone 1183 (CAS 80475-32-7)
Petrofilm 3		2012-2022	PFHxA (100%)	Capstone 1470 (CAS 76201-56-4)

3.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

La stratégie d'échantillonnage doit permettre de déterminer la distribution spatiale, les teneurs et la mobilité des polluants sur le site (MTECT, 2023). Comme le montrent les études présentées dans ce rapport, de nombreuses stratégies d'échantillonnage peuvent être mises en place sur les sites AFFF en fonction du degré de connaissance et des aménagements du site. Ces méthodologies, toutes en accord avec la méthodologie nationale pour les diagnostics des sites et sols pollués (MTECT, 2023), sont décrites dans les paragraphes suivants.

3.3.1. Répartition des échantillons

Cet état des lieux montre que les stratégies d'échantillonnage appliquées ne diffèrent pas de celles habituellement mises en place pour les polluants organiques. Ainsi deux stratégies majeures dominent **pour l'échantillonnage des différentes matrices** sur les sites d'utilisation des AFFF :

- un échantillonnage aléatoire au sein de secteurs prédécoupés (ex : découpage en zones sources, avals, et amont) ou non (cf. Figure 8A) ;
- un échantillonnage systématique (prélèvements à intervalles réguliers selon un maillage ou un plan prédéfini) dans un périmètre plus ou moins restreint autour de la zone source (ex de la Norvège, AVINOR, 2012) (cf. Figure 8B).

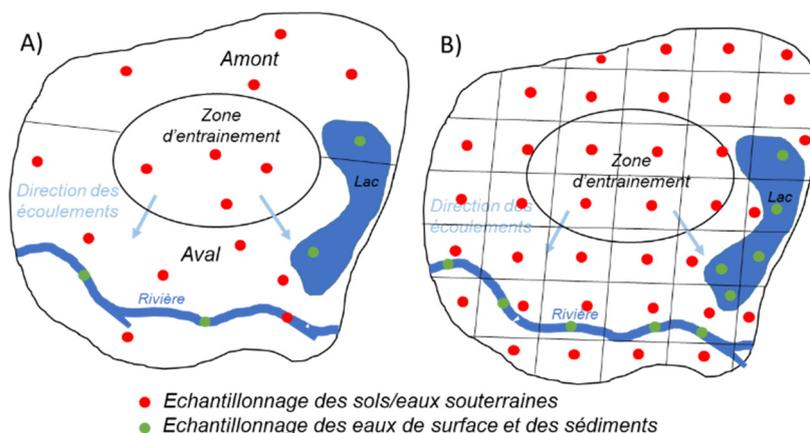


Figure 8 : Exemple de stratégie d'échantillonnage A) aléatoire au sein de secteurs prédécoupés, B) systématique/régulier.

Afin de réduire le nombre d'échantillons et son coût, l'échantillonnage aléatoire au sein des zones sensibles (où l'existence d'une pollution est suspectée sur la base des résultats des études historique ou d'études antérieures) est souvent privilégié (ex : Finlande et Canada). A noter que différentes campagnes de diagnostic combinant les deux approches sont parfois nécessaires; l'une comportant une première approche basée sur un échantillonnage aléatoire de faible densité permettant d'identifier les zones les plus fortement polluées à moindre coût, l'autre visant à intensifier les prélèvements et les analyses pour caractériser et circonscrire plus finement les zones les plus fortement polluées.

Concernant **les eaux souterraines**, les prélèvements sont généralement effectués dans les piézomètres existants pour limiter les coûts ou dans des forages installés spécifiquement sur les sites (si le réseau existant est insuffisant ou inadapté). Dans la plupart des cas, les échantillons de sols et d'eaux souterraines sont prélevés à proximité, voire dans les mêmes forages pour

permettre une comparaison de la signature chimique des eaux et des sols. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les risques sanitaires (dans le cadre d'une approche d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM)), l'échantillonnage des eaux souterraines peut consister à prélever uniquement dans les piézomètres en aval hydraulique de la source, à proximité des captages AEP ou des puits privés (ex : jardins) (Bräunig et al., 2017).

Concernant les eaux de surface, les stations d'échantillonnage sont généralement les mêmes pour les eaux et **les sédiments**. L'échantillonnage des eaux superficielles et des sédiments concernent les plans d'eau (étangs et lacs), les cours d'eau naturels ainsi que les réseaux artificiels (ex : canaux et fossés de drainage) de taille variable. Un échantillonnage ciblant uniquement les fossés, les cours d'eau ou les plans d'eau en aval hydraulique de la source de pollution sont parfois mis en place lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact hors du site et les risques sanitaires, (Kärman et al., 2011; Reinikainen et al., 2022, 2019). La période de prélèvement n'est généralement pas mentionnée dans les études présentées dans ce rapport. Cependant, le choix de la saison à laquelle le prélèvement est effectué est à choisir avec précaution car il doit prendre en compte les variations saisonnières de débits des cours d'eau, des variations du niveau des nappes phréatiques, et des changements éventuels des relations nappes-rivières qui peuvent parfois fortement modifier la dynamique des polluants et les concentrations mesurées (MTECT, 2023). Des prélèvements synchrones des eaux de surface avec les eaux souterraines sont parfois pertinents (MTECT, 2023).

L'ensemble de ces approches sont celles classiquement utilisées pour la plupart des polluants et ne sont donc pas spécifiques aux PFAS.

3.3.2. Prélèvements

Cet état des lieux montre que selon le contexte du site et les objectifs de l'étude la profondeur des investigations peut fortement varier.

Pour les sols, les investigations peuvent cibler la surface (0-30 cm) (ex: Suède, Ahrens et al., 2015) ou s'étendre sur plusieurs mètres de profondeur, jusqu'au toit de la nappe phréatique (ex: Norvège, USA, AVINOR, 2012a; Nickerson et al., 2020). Lorsque l'objectif est d'évaluer les risques sanitaires, les sols sont généralement prélevés dans les 10 premiers centimètres du sol (ex: Australie, Finlande, Bräunig et al., 2017; Reinikainen et al., 2022, 2019). A noter, qu'en général, pour évaluer l'exposition aux sols de surface, les méthodes classiquement mises en œuvre pour la plupart des polluants est un échantillonnage des sols de 5 à 10 cm, pouvant être étendu à 40 cm pour les sols agricoles labourés. Cependant, lorsqu'il s'agit de délimiter l'étendue de la pollution et la capacité de transfert des polluants (pour établir un bilan massique ou définir une enveloppe 3D de la zone de pollution concentrée par exemple), il semble préférable d'échantillonner les sols à intervalles réguliers le long des profils de forage ou dans les horizons de sols présentant des particularités pouvant impacter le transfert des polluants. Il a effectivement été montré dans les études présentées dans ce rapport que les teneurs en PFAS pouvaient augmenter significativement dans les sols avec les teneurs en argiles, en matières organiques, en calcite (Adamson et al., 2022; Bigler et al., 2024; Brusseau and Guo, 2022; Høisæter et al., 2019), ou avec la diminution de la teneur en eau et l'augmentation de la surface de l'interface air-eau (Brusseau and Guo, 2022). Ainsi, selon les contextes (composition des émulseurs, âge de la pollution, composition du sol, taux d'infiltrations), les teneurs en PFAS des sols peuvent augmenter ou diminuer significativement avec la profondeur. Cela souligne l'importance de ne pas limiter les investigations aux 30 premiers centimètres du sol, mais de l'élargir à l'ensemble de la zone non saturée en veillant également à échantillonner les horizons particuliers ayant pu affecter le transfert et la rétention des PFAS.

Pour les eaux souterraines, les échantillons sont parfois prélevés en surface de la nappe lorsqu'il s'agit uniquement de caractériser la présence de PFAS dans celle-ci (Reinikainen et al., 2022, 2019), mais comme pour les sols, un échantillonnage sur différentes profondeurs, permet d'étudier le transfert vertical des PFAS dans la nappe (notamment pour les nappes au sein desquelles des gradients verticaux de pression peuvent exister) et ainsi de délimiter l'envergure des panaches (Adamson et al., 2022; AVINOR, 2012a; Nickerson et al., 2020).

La profondeur à laquelle les échantillons **d'eaux de surface sont prélevés n'est** généralement pas mentionnée dans les études disponibles. Cependant, les prélèvements dans les eaux de surface se font généralement à plus de 30 cm de profondeur pour éviter les effets de surface et à au moins 50 cm du fond pour éviter les matières en suspension (MTECT, 2023). En cas de faible profondeur, les échantillons sont pris à mi-hauteur. Plusieurs échantillons peuvent être également prélevés selon des transects perpendiculaires à la direction de l'écoulement. Le débit sur ce profil est alors mesuré pour obtenir un flux massique véhiculé en kg/j.

Les sédiments sont généralement prélevés en surface ou subsurface (de 0 à 30 cm de profondeur, Ahrens et al., 2015; Anderson et al., 2016; Kwadijk et al., 2014; Reinikainen et al., 2022) .

Le type d'échantillon prélevé **pour les sols** varie selon les études et est à adapter aux objectifs visés. Par exemple, lorsqu'il s'agit de caractériser la variabilité spatiale de la pollution sur une zone ou une profondeur donnée, le prélèvement d'échantillons ponctuels remaniés (prélevés à la tarière ou à la pelle) ou non remaniés (carottes) sont privilégiés (ex: AVINOR, 2012a; Bräunig et al., 2017; Filipovic et al., 2015). Cependant, lorsqu'il s'agit de déterminer la composition moyenne d'une zone supposée homogène, un échantillonnage composite de plusieurs dizaines de prises unitaires de sol prélevés sur une surface prédéterminée à chaque point d'échantillonnage et homogénéisés est à privilégier pour s'affranchir de potentielles variations locales de teneurs liés à des effets de matrice (ex: Dauchy et al., 2019; Reinikainen et al., 2022, 2019).

Les études disponibles concernant les sites d'utilisation d'AFFF ne donnent que peu de détails sur les méthodes et le matériel utilisé pour le prélèvement **des eaux souterraines et de surface**. Cependant il ne semble pas exister de techniques spécifiques aux PFAS. Les prélèvements (si précisés) sont généralement effectués classiquement par pompage, ou à l'aide d'un échantillonneur à immersion jetable (type *bailer*) (eaux souterraines) ou réalisés directement ponctuellement dans la masse d'eau en utilisant un seau ou le flaconnage destiné à l'analyse (eaux de surface). Les techniques classiquement utilisées pour l'échantillonnage des eaux souterraines et de surface peuvent donc être appliquées (MTECT, 2023, Norme NFX 31-615). La méthode et le matériel sont à choisir en fonction des objectifs, de la profondeur de l'échantillonnage mais aussi des conditions de milieu et du diamètre des puits (en veillant à éviter les matériaux cités en Tableau 17).

Pour **les sédiments**, les prélèvements sont parfois effectués à la benne à sédiment Ekman (Ahrens et al., 2015). Lorsque l'objectif est de caractériser la qualité moyenne **des sédiments** à proximité des sites (en amont, aval et au droit des sites), l'échantillonnage composite est souvent privilégié afin d'intégrer l'hétérogénéité globale parfois forte des sédiments sur la zone échantillonnée (Kwadijk et al., 2014; Reinikainen et al., 2022, 2019; SFT, 2008). Cependant, lorsqu'une caractérisation plus fine est nécessaire à un emplacement donné (ex : sortie de conduits ou fossés de drainage), la réalisation d'un échantillon ponctuel peut être plus adapté (MTECT, 2023). Enfin, le carottage de sédiments peut aussi être envisagé puisqu'il peut permettre d'évaluer des profils de teneurs (en lien avec l'évolution temporelle de la qualité de l'eau (datation)).

3.3.3. Précautions à prendre pour l'échantillonnage et le transport

De nombreux bien de consommation, d'équipement de protection individuel (EPI) et de matériaux utilisés lors de l'échantillonnage contiennent ou peuvent potentiellement contenir des PFAS. La **gestion des contaminations croisées** est donc un enjeu capital lors de la caractérisation des sites pollués par les PFAS comme les sites d'utilisation d'AFFF. Plusieurs guides et projets traitent le sujet et émettent des recommandations pour éviter les contaminations croisées lors de l'échantillonnage, du transport et de l'analyse (EGLE, 2024; ITRC, 2024; Merly, 2020; SCENARIOS, 2023; SFSE, 2023; UBA, 2022; US-EPA, 2019). Néanmoins, à ce jour, il existe peu d'information dans la littérature scientifique concernant la manière dont les matériaux utilisés pour l'échantillonnage ou le personnel de terrain peuvent affecter les résultats d'analyse pour les PFAS (Denly et al., 2019; Field et al., 2021; ITRC, 2024; Rodowa et al., 2020; SFSE, 2023). Dans ce contexte, il est donc recommandé aux bureaux d'étude en charge du prélèvement et des laboratoires d'analyse d'éviter l'utilisation d'un certain nombre de matériaux contenant des PFAS (Tableau 17).

Tab. 17 : Recommandations à suivre pour éviter tous types de contaminations croisées lors de l'échantillonnage, du transport, de l'analyse et une bonne conservation des échantillons.

	Matériel non recommandé	Matériel et protocole préconisé
Nettoyage du matériel de terrain	<ul style="list-style-type: none"> • Détergents contenant des substances fluorées (ex : Decon 90) • Eau non certifiée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Détergents sans produits fluorés (ex : Liquinox®, and Citranox®), du Méthanol ou de l'eau déionisée/triple distillée certifiée sans PFAS,
Echantillonnage et contenants	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE, y compris le téflon, PVDF, PCTFE, ETFE, FEP, LDPE, bouteille en verre. <i>Attention aux pompes, aux échantillonneurs automatique, aux seaux et aux perches utilisés).</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • PVS, PEHD, PP, PE, nylon, acier inoxydable, silicone. (<i>Attentions aux couvercles, joints des flacons).</i>
Conservation, stockage et expédition	<ul style="list-style-type: none"> • Bloc de glace chimique. Les échantillons ne doivent pas être exposés directement aux pains de glace. 	<ul style="list-style-type: none"> • Placer les échantillons dans des doubles emballage (ex : Ziploc), • Bloc de glace ordinaire, • Conservation à T° ≤ 6°C (-20°C pour une plus longue conservation), • Extraction en moins de 14 jours et analyse en moins de 28 jours pour éviter la transformation des PFAS dont la demi-vie est courte, • ...
Equipement du personnel de terrain	<ul style="list-style-type: none"> • Marqueurs larges, papier résistant à l'eau et aux tâches, papier et cahier cartonné, imperméabilisé, papier adhésif (ex Post-it®, étiquettes), • Presse papier imperméable, • Gants en latex, • Vêtements imperméables traités chimiquement (ex : Gore-Tex™, cotchgard™), lavés avec des adoucissants, des vêtements en matière synthétique, les vêtements neufs, • Dans les 24h avant les prélèvements : écrans solaires, insectifuges, maquillage, diffuseur anti-moustique, • Bouteilles d'eau en plastique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stylo à bille, • Papier ordinaire en vrac, • Ecrire le nom de l'échantillon sur le double emballage et non sur l'échantillon, • Gants en nitrile, • Vêtements en coton ou laine, vêtement imperméables en PVC, Néoprène, ou Polyuréthane.

A noter que ces recommandations sont théoriques car l'impact sur les résultats de l'utilisation de certains de ces matériaux déconseillés ici n'a pas encore été vérifié et fait actuellement l'objet d'études. Ces matériaux pourraient donc, si besoin, être utilisés à condition de vérifier au préalable l'absence d'impact sur les résultats.

Afin de s'assurer de l'absence de contaminations et, à défaut, pouvoir rectifier les concentrations mesurées, il est donc fortement recommandé d'effectuer des blancs de terrain (incluant les facteurs équipement, transport, opérateur...) pour l'ensemble du matériel utilisé ainsi que des blancs d'analyse pour l'ensemble du matériel utilisé avant et/ou pendant les campagnes. Par exemple, les retours d'expérience montrent que les blancs de certains d'équipement de terrain peuvent être contaminés par la présence de PFAS à chaînes longues et courtes (ex : PFHxS, PFHpS, PFOS) ou de 6:2 FTSA avec des concentrations pouvant atteindre de 0,1 à plusieurs dizaines de ng/L (ITRC, 2024). Il est également possible de réaliser des duplicata d'échantillonnage et d'analyse pour estimer la qualité des mesures mises en œuvre et diminuer les incertitudes qui y sont associées.

3. Conclusions

Cet état des lieux fait la synthèse d'une vingtaine d'études à travers le monde portant toutes sur la caractérisation des pollutions aux PFAS sur des sites d'entraînement à la lutte contre les incendies où des mousses anti-incendie de type AFFF ont été utilisées. Plusieurs types de sites ont été investigués dans ces études : sites d'entraînement des pompiers, sites d'entraînement à la lutte contre les incendies de sites industriels, base militaires, aéroports civiles, zones d'intervention d'urgence.

Les résultats de ces études montrent que l'utilisation d'AFFF a pu entraîner une pollution très importante des différentes matrices environnementales de ces sites. Les milieux les plus impactés sont les sols et les eaux souterraines, où des teneurs / concentrations de l'ordre du mg/kg et du mg/L sont souvent mesurées. Cependant, la pollution peut également toucher les eaux de surface situées en aval hydraulique des sites ou en connexion avec les eaux souterraines impactées. Les PFAS peuvent alors s'accumuler dans les poissons et les sédiments de ces lacs et cours d'eau et présenter un risque pour la santé humaine en cas d'ingestion.

Cet état des lieux montre qu'il est impossible de dresser un schéma détaillé, générique et complet du comportement des PFAS sur les sites AFFF tant il peut s'avérer complexe et variable en fonction :

- des substances (groupement fonctionnel, longueur de chaîne carbonée, aptitude à se dégrader plus ou moins rapidement en d'autres PFAS) ;
- des caractéristiques hydrologiques, topographiques, géologiques des sites et des infrastructures présentes ;
- de la composition et des propriétés physico-chimiques du sol (pH, teneur en eau, en argiles en matière organique, en calcite etc.) ;
- des conditions climatiques et environnantes (ex : taux d'infiltration).

Ainsi, la nature et les teneurs / concentrations en PFAS peuvent largement varier dans les sols et les eaux souterraines sur et entre les sites en fonction de ces paramètres, mais aussi selon la composition et les volumes d'AFFF utilisés et de l'âge de la pollution (dégradation progressive des précurseurs le long des voies de transfert). Les teneurs en PFAS des sols peuvent aussi largement fluctuer en profondeur, soulignant la nécessité d'élargir les investigations à l'ensemble de la zone non saturée et non uniquement aux 30 premiers centimètres. Ainsi, il conviendra de prendre en considération ces paramètres au cas par cas afin d'identifier les voies de transport et d'exposition pertinentes pour chaque site et chaque substance.

Les substances identifiées sur les sites AFFF peuvent être nombreuses mais seule une petite partie est actuellement couramment recherchée et quantifiée sur les sites en raison de limitations analytiques. Ainsi parmi les substances actuellement recherchées, les C₄-C₁₄ PFCAs, les C₃-C₁₀ PFSA, le 4:2, 6:2 et 8:2 et 10:2 FTSA, le FHxSA, le FOSA, MeFOSA, l'EtFOSA, le FOSAA, le MeFOSAA le MeFOSE, l'EtFOSE, le Cl-PFOS, le 6:2 FTA, le PFOSi, le PFHxSi et le 6:2 FTAB sont les plus présentes sur les sites d'utilisation des mousses anti-incendie. Les principales substances à rechercher sur les sites AFFF lors des diagnostics pourraient donc être sélectionnées parmi les substances listées ci-dessus.

Cet état des lieux montre qu'il n'y a pas de méthodologie spécifique pour l'échantillonnage et la caractérisation des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des AFFF. L'ensemble des études synthétisées dans ce rapport suivent la méthodologie classiquement utilisée pour le diagnostic des sites et sols pollués, en l'adaptant au contexte hydrogéologique des sites et aux objectifs

spécifiques des campagnes (ex : impacts sur les eaux souterraines, caractérisation des transferts, évaluation des risques, etc.). Cependant, en raison de l'omniprésence des PFAS dans de nombreux bien de consommation, consommables et fournitures de laboratoire, des précautions supplémentaires doivent être prises lors de l'échantillonnage, du transport et de l'analyse pour éviter toutes contaminations de l'échantillon. Ainsi un certain nombre de matériaux et produits de consommation contenant ou pouvant contenir des PFAS doivent être proscrits des équipements de terrain, et du laboratoire chargé des analyses par un principe de précaution en absence de données montrant l'absence d'impact sur les résultats. Il est également fortement recommandé de renforcer pour cette famille de substances, la réalisation de blancs pour les opérations de terrain (blancs terrain incluant les facteurs matériel, transport, opérateurs...) et pour les opérations d'analyse pour l'ensemble du matériel utilisé avant et/ou pendant les campagnes.

4. Références

- Adamson, D.T., Kulkarni, P.R., Nickerson, A., Higgins, C.P., Field, J., Schwichtenberg, T., Newell, C., Kornuc, J.J.**, 2022. Characterization of relevant site-specific PFAS fate and transport processes at multiple AFFF sites. *Environmental Advances* 7, 100167.
- Adamson, D.T., Nickerson, A., Kulkarni, P.R., Higgins, C.P., Popovic, J., Field, J., Rodowa, A., Newell, C., DeBlanc, P., Kornuc, J.J.**, 2020. Mass-based, field-scale demonstration of PFAS retention within AFFF-associated source areas. *Environmental science & technology* 54, 15768–15777.
- Ahrens, L., Norström, K., Viktor, T., Cousins, A.P., Josefsson, S.**, 2015. Stockholm Arlanda Airport as a source of per-and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish. *Chemosphere* 129, 33–38.
- Anderson, R.H., Long, G.C., Porter, R.C., Anderson, J.K.**, 2016. Occurrence of select perfluoroalkyl substances at US Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire-training areas: Field-validation of critical fate and transport properties. *Chemosphere* 150, 678–685.
- AVINOR**, 2012a. Miljøprosjektet - DP 2, Miljøtekniske grunnundersøkelser ved Avinors lufthavner (No. 168180–1). AVINOR, SWECO.
- AVINOR**, 2012b. Miljøprosjektet DP 2 Miljøtekniske grunnundersøkelser (No. 168180-XXX–1), 168180. AVINOR, SWECO.
- AVINOR**, 2012c. Miljøprosjektet – DP 2: Miljøtekniske grunnundersøkelser ved Avinors flyplasser. (No. 168180–1). SWECO/AVINOR.
- Backe, W.J., Day, T.C., Field, J.A.**, 2013. Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from US military bases by nonaqueous large-volume injection HPLC-MS/MS. *Environmental science & technology* 47, 5226–5234.
- Bigler, M.C., Brusseau, M.L., Guo, B., Jones, S.L., Pritchard, J.C., Higgins, C.P., Hatton, J.**, 2024. High-Resolution Depth-Discrete Analysis of PFAS Distribution and Leaching for a Vadose-Zone Source at an AFFF-Impacted Site. *Environ. Sci. Technol.* 58, 9863–9874. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c01615>.
- Bräunig, J., Baduel, C., Heffernan, A., Rotander, A., Donaldson, E., Mueller, J.F.**, 2017. Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of The Total Environment* 596–597, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>.
- BRGM**, 2024a. État des lieux des substances poly et perfluorées associées à l'utilisation des mousses anti-incendie (AFFF). Rapport final V1 (No. BRGM/RP-73431-FR). BRGM.
- BRGM**, 2024b. Etat des lieux des sources d'émission directes en PFAS. (No. BRGM/RP-73452-FR). BRGM.
- Brusseau, M.L.**, 2019. The influence of molecular structure on the adsorption of PFAS to fluid-fluid interfaces: Using QSPR to predict interfacial adsorption coefficients. *Water Research* 152, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.057>.
- Brusseau, M.L., Guo, B.**, 2022. PFAS concentrations in soil versus soil porewater: Mass distributions and the impact of adsorption at air-water interfaces. *Chemosphere* 302, 134938. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134938>.

Choi, Y.J., Helbling, D.E., Liu, J., Olivares, C.I., Higgins, C.P., 2022. Microbial biotransformation of aqueous film-forming foam derived polyfluoroalkyl substances. *Science of The Total Environment* 824, 153711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153711>.

Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F., 2017. Per-and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams. *Chemosphere* 183, 53–61.

Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F., 2019a. Poly-and perfluoroalkyl substances in runoff water and wastewater sampled at a firefighter training area. *Archives of environmental contamination and toxicology* 76, 206–215.

Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hémard, J., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F., 2019b. Deep seepage of per-and polyfluoroalkyl substances through the soil of a firefighter training site and subsequent groundwater contamination. *Chemosphere* 214, 729–737.

De Silva, A.O., Spencer, C., Scott, B.F., Backus, S., Muir, D.C., 2011. Detection of a cyclic perfluorinated acid, perfluoroethylcyclohexane sulfonate, in the Great Lakes of North America. *Environmental Science & Technology* 45, 8060–8066.

Denly, E., Occhialini, J., Bassignani, P., Eberle, M., Rabah, N., 2019. Per-and polyfluoroalkyl substances in environmental sampling products: Fact or fiction? *Remediation Journal* 29, 65–76.

DIN 38407-42, 2011. German standard methods for the examination of water, waste water and sludge - Jointly determinable substances (group F) - Part 42: Determination of selected polyfluorinated compounds (PFC) in water - Method using high performance liquid chromatography and mass spectrometric detection (HPLC/MS-MS) after solid-liquid extraction (F 42).

DIN 38414-14, 2011. German standard methods for the examination of water, waste water and sludge - Sludge and sediments (group S) - Part 14: Determination of selected polyfluorinated compounds (PFC) in sludge, compost and soil - Method using high performance liquid chromatography and mass spectrometric detection (HPLCMS/ MS) (S 14).

EGLE, 2024. GENERAL PFAS SAMPLING GUIDANCE (No. Michigan.gov/EGLE 800-662-9278). EGLE-Michigan department of Environment, Great Lakes, and Energy.

Field, J., Schwichtenberg, T., Rula, A.D., Hawley, E.L., Sayler, C., Bogdan, D., Shaefer, C.E., Drennan, D., Nguyen, D., DiGuseppi, B., Struse, A., 2021. Assessing the Potential for Bias in PFAS Concentrations during Groundwater and Surface Water Sampling (No. Project ER19-1205). SERDP.

Filipovic, M., Woldegiorgis, A., Norström, K., Bibi, M., Lindberg, M., Österås, A.-H., 2015. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. *Chemosphere* 129, 39–45.

Gonda, N., Choyke, S., Schaefer, C., Higgins, C.P., Voelker, B., 2023. Hydroxyl Radical Transformations of Perfluoroalkyl Acid (PFAA) Precursors in Aqueous Film Forming Foams (AFFFs). *Environ. Sci. Technol.* 57, 8053–8064. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08689>.

Guelfo, J.L., Higgins, C.P., 2013. Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Environmental science & technology* 47, 4164–4171.

Guo, B., Zeng, J., Brusseau, M.L., 2020. A Mathematical Model for the Release, Transport, and Retention of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Vadose Zone. *Water Resources Research* 56, e2019WR026667. <https://doi.org/10.1029/2019WR026667>.

Høisæter, Å., Pfaff, A., Breedveld, G.D., 2019. Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of contaminant hydrology* 222, 112–122.

Houtz, E.F., Higgins, C.P., Field, J.A., Sedlak, D.L., 2013. Persistence of perfluoroalkyl acid precursors in AFFF-impacted groundwater and soil. *Environmental science & technology* 47, 8187–8195.

ISO, 2008. Water quality – determination of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) – method for unfiltered samples using solid phase extraction and liquid chromatography/mass spectrometry.

ITRC, 2024. Technical Resources for Addressing Environmental Releases of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Interstate Technology and Regulatory Council, PFAS Team.

Kabiri, S., Navarro, D.A., Hamad, S.A., Grimison, C., Higgins, C.P., Mueller, J.F., Kookana, R.S., McLaughlin, M.J., 2023. Physical and chemical properties of carbon-based sorbents that affect the removal of per- and polyfluoroalkyl substances from solution and soil. *Science of The Total Environment* 875, 162653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162653>.

Kabiri, S., Tucker, W., Navarro, D.A., Bräunig, J., Thompson, K., Knight, E.R., Nguyen, T.M.H., Grimison, C., Barnes, C.M., Higgins, C.P., Mueller, J.F., Kookana, R.S., McLaughlin, M.J., 2022. Comparing the Leaching Behavior of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from Contaminated Soils Using Static and Column Leaching Tests. *Environ. Sci. Technol.* 56, 368–378. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06604>.

Kärrman, A., Elgh-Dalgren, K., Lafossas, C., Møskeland, T., 2011. Environmental levels and distribution of structural isomers of perfluoroalkyl acids after aqueous fire-fighting foam (AFFF) contamination. *Environmental chemistry* 8, 372–380.

Kwadijk, C.J., Kotterman, M., Koelmans, A.A., 2014. Partitioning of perfluorooctanesulfonate and perfluorohexanesulfonate in the aquatic environment after an accidental release of aqueous film forming foam at Schiphol Amsterdam Airport. *Environmental toxicology and chemistry* 33, 1761–1765.

Liao, S., Arshadi, M., Woodcock, M.J., Saleeba, Z.S.S.L., Pinchbeck, D., Liu, C., Cápiro, N.L., Abriola, L.M., Pennell, K.D., 2022. Influence of Residual Nonaqueous-Phase Liquids (NAPLs) on the Transport and Retention of Perfluoroalkyl Substances. *Environ. Sci. Technol.* 56, 7976–7985. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00858>.

Liu, H., Guo, Z., Zhu, Y., Van Glubt, S., Brusseau, M.L., 2024. The influence of NAPL distribution on the transport of PFOS in Co-contaminated media. *Journal of Hazardous Materials* 462, 132794. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132794>.

Liu, L., Lu, M., Cheng, X., Yu, G., Huang, J., 2022. Suspect screening and nontargeted analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in representative fluorocarbon surfactants, aqueous film-forming foams, and impacted water in China. *Environment International* 167, 107398.

Liu, M., Munoz, G., Vo Duy, S., Sauvé, S., Liu, J., 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances in contaminated soil and groundwater at airports: a Canadian case study. *Environmental Science & Technology* 56, 885–895.

Merly, C., 2020. Les composés alkyls poly/per fluorés. Etat de l'art et enjeux dans un contexte SSP. (No. BRGM RP-69594-FR). BRGM.

Miljøministeriet, 2014. Screeningsundersøgelse af udvalgte PFASforbindelser som jord- og grundvandsforurening i forbindelse med punktkilder (No. Miljøprojekt nr. 1600, 2014). Miljøministeriet.

MTECT, 2023. Guide Diagnostics des sites et sols pollués. MTECT/DGPR/B3S, BRGM, INERIS, ADEME.

- Nickerson, A., Maizel, A.C., Schaefer, C.E., Ranville, J.F., Higgins, C.P.**, 2023. Effect of geochemical conditions on PFAS release from AFFF-impacted saturated soil columns. *Environ. Sci.: Processes Impacts* 25, 405–414. <https://doi.org/10.1039/D2EM00367H>.
- Nickerson, A., Rodowa, A.E., Adamson, D.T., Field, J.A., Kulkarni, P.R., Kornuc, J.J., Higgins, C.P.**, 2020. Spatial Trends of Anionic, Zwitterionic, and Cationic PFASs at an AFFF-Impacted Site. *Environ. Sci. Technol.* 55, 313–323. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04473>.
- Place, B.J., Field, J.A.**, 2012. Identification of novel fluorochemicals in aqueous film-forming foams used by the US military. *Environmental science & technology* 46, 7120–7127.
- PROMISCES, López de Alda, M.**, 2023. PROMISCES_D2.2 – Characterization of PFAS and chlorinated solvent contamination in two aquifers in Spain*.
- RECORD**, 2024. COMPOSES PERFLUOROALKYLES ET POLYFLUOROALKYLES (PFAS) DANS LES SOLS EN PLACE ET MATERIAUX EXCAVES (SOLS ET SEDIMENTS). Identification, quantification et valeurs de référence. Rapport final. (No. 22- 0173/1A).
- Reinikainen, J., Perkola, N., Äystö, L., Sorvari, J.**, 2022. The occurrence, distribution, and risks of PFAS at AFFF-impacted sites in Finland. *Science of the Total Environment* 829, 154237.
- Reinikainen, J., Perkola, N., Takala, M., Äystö, L.**, 2019. Perfluorattujen alkyylilyhdisteiden ympäristötutkimukset ja riskinarviointi. SYKE, Helsinki.
- Richardson, M.J., Kabiri, S., Grimison, C., Bowles, K., Corish, S., Chapman, M., McLaughlin, M.J.**, 2022. Per- and Poly-Fluoroalkyl Substances in Runoff and Leaching from AFFF-Contaminated Soils: a Rainfall Simulation Study. *Environ. Sci. Technol.* 56, 16857–16865. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05377>.
- Rodowa, A.E., Christie, E., Sedlak, J., Peaslee, G.F., Bogdan, D., DiGiuseppi, B., Field, J.A.**, 2020. Field sampling materials unlikely source of contamination for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in field samples. *Environmental science & technology letters* 7, 156–163.
- Rosenqvist, L.**, 2020. Utvärdering av påverkan på grundvatten från platser där släckskum hanterats. SGU.
- SCENARIOS**, 2023. SCENARIOS - Innovative analytical methods for detection and monitoring of PFAS. D2.1 SOP for sample storage and handling.
- SFSE**, 2023. Evaluation et gestion des PFAS. Fiches pratiques. Fiche 5: Méthodes des prélèvements : Sols, Eaux et Air.
- SFT**, 2008. Screening of polyfluorinated organic compounds at four fire training facilities in Norway (No. TA-2444/2008). Norwegian Pollution Control Authority.
- Shaw, D.M., Munoz, G., Bottos, E.M., Duy, S.V., Sauvé, S., Liu, J., Van Hamme, J.D.**, 2019. Degradation and defluorination of 6: 2 fluorotelomer sulfonamidoalkyl betaine and 6: 2 fluorotelomer sulfonate by *Gordonia* sp. strain NB4-1Y under sulfur-limiting conditions. *Science of the Total Environment* 647, 690–698.
- UBA**, 2022. Guidelines for PFAS assessment 56.
- US-EPA**, 2019. Field Equipment Cleaning and Decontamination at the FEC. OPERATING PROCEDURE. (No. ASBPROC-206-R4).
- Van Glubt, S., Brusseau, M.L.**, 2021. Contribution of Nonaqueous-Phase Liquids to the Retention and Transport of Per and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Porous Media. *Environ. Sci. Technol.* 55, 3706–3715. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07355>.

Wang, Y., Vestergren, R., Shi, Y., Cao, D., Xu, L., Cai, Y., Zhao, X., Wu, F., 2016. Identification, Tissue Distribution, and Bioaccumulation Potential of Cyclic Perfluorinated Sulfonic Acids Isomers in an Airport Impacted Ecosystem. *Environ. Sci. Technol.* 50, 10923–10932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01980>.

Weiner, B., Yeung, L.W., Marchington, E.B., D'Agostino, L.A., Mabury, S.A., 2013. Organic fluorine content in aqueous film forming foams (AFFFs) and biodegradation of the foam component 6: 2 fluorotelomermercaptoalkylamido sulfonate (6: 2 FTSAS). *Environmental Chemistry* 10, 486–493.

Yan, P.-F., Dong, S., Pennell, K.D., Cápiro, N.L., 2024. A review of the occurrence and microbial transformation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aqueous film-forming foams (AFFFs)-impacted environments. *Science of The Total Environment* 171883.

Annexe 1

Gamme de concentration des PFAS dans les différentes matrices des sites d'utilisation d'AFFF.

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Tableau A1 : Gamme de concentration (ng/L) des PFAS dans les eaux souterraines et de surface des sites d'utilisation d'AFFF. En, gris foncé, les substances mesurées au-dessus de la limite de quantification (LQ).

Etude	Activités	PFPrA	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUdA	PFDoA	PFTrDA	PFTeDA	PFHxDA	PFOxDA	PFEtS	PFPrS	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFDoS	4:2 FTSA	6:2 FTSA	8:2 FTSA	
Reinikainen et al., 2022	ELCI		0,52-900	0,11-4100	0,13-6500	0,12-1300	0,11-2800	0,14-3300	0,16-63	0,33-350	0,52-2,8	1,1-16	<LQ	<LQ	<LQ			0,11-3500		0,14-13000	0,26-3200	0,11-42000		0,67-8,0		0,7-16	0,11-10000	0,11-250	
Miljoministriet, 2014	ELCI, IU,				10-5300	10-1800	10-710	10-98										10-20		10-220		10-980		<LQ					
Houtz et al., 2013	ELCI		0-87000	0-220000	0-320000	0-33000	0-190000	0-2900										0-140000		0-530000	0-18000	0-100000					0-27000	0-7100	
PROMISCE S, 2023	ELCI		0-1247	0-112071	0-9137	0-1549	0-504	0,2-67	0-63	0-2,89	<LQ	0-65	<LQ	<LQ	<LQ			1,7-129	0-149	0-890	0-38	0-1098	0-7,2	0-2,4	0-1,4	0-3,2	0-213	0-15	
Anderson et al., 2016	IU		0,01-14	0,01-32	0,0063-79	0,018-12	0,012-50	0,057-0,45	0,0098-0,32	0,011-0,011	<LQ	<LQ	<LQ					0,012-91		0,0071		0,019-2800		0,017-0,86					
	ZS		0,01-140	0,015-220	0,071-710	0,051-130	0,0086-950	0,022-59	0,0079-59	0,016-14	0,03-6-84	0,44-29	1,2-6,4					0,015-480		0,023-2700		0,09-190000		0,04-2200					
	ZEM		0,021-0,56	0,032-1,5	0,11-2,4	0,021-0,095	0,048-2,0	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ					0,049-0,053		0,39-6,7		1,4-42		1,6-2,2					
Nickerson et al., 2021;	ELCI		1,1-950	1-860	1-880	1-970	1-910	1,3-930	1-900								1,1-990	1-950	1,1-820	1-980	1,6-940	1,3-860	1-760			1,3-970	1,1-860	1-890	
Adamson et al., 2022	ELCI		20-240000	19-500000	14-500000	30-500000	11-500000	14-3300	160-160	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	170-5200		32-190000	15-500000	12-500000	11-500000	27-67000	11-500000	31-1100	<LQ	<LQ	29-330	39-23000	180-7100	
	ZS et, ELCI		29-730	25-3600	37-120000	14-20000	17-89000	25-4100	44-190	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ				25-3700	16-2500	13-23000	27-410000	28-1000	21-3700000	14-650	14-650	40-750	280-2000	11-5500	11-3000	
AVINOR 2012a, b (SFT, 2008)	ELCI					<2,5-6480															<2,5-1400000					<7,5-39800	ND		
	ELCI				169-1585	<11,4-291	<97,6-1457	<12,4-219	<13,9	<18,7	<16,2	<10	<14,8					94-1743		705-5952		2394-40116		<7,4		611-7194			
Hoisæter et al., 2019	ELCI																				6500-44400								
Ahrens et al., 2015	ELCI				8,2-34		13-80													54-104		59-137							
Dauchy et al., 2019	ELCI		<4-327	<4-902	<4-1340	<4-224	<4-341	<4-<40	<4-<40	<4-<40	<4-<40	<4-<100	<4-<100					<4-750		<4-2860	<4-204	<4-581		<4-40		<4-40	<4-790	<4-<40	
Filipovic et al., 2015	ELCI, IU, ZS				<0,5-900		<1-4470													<0,5-3470		<1-51000							
Kwadijk et al., 2014	F																	<0,1-220		2,8-560		40-1600							
Bräunig et al., 2017	ELCI		110-290	80-270	80-860	130-220	60-580	150-150	130-130									80-670		40-5300		60-13000							
Liu et al., 2021	ELCI		0-18900	100-37600	100-79500	100-187200	100-30100	100-35700	100-2000	200	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ			0-1900	0-30700	200-59200	200-48300	100-232900	200-25800	100-1622500	0-11100	400-200	<LQ	400-5700	300-13275	500-2300

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Etude	Acti- vités	10:2 FTS A	FOSA	Et FOSA	Me FOSA	FOSA A	Me FOSA A	Et FOSA A	Cl- PFOS A	Cl- PFNS	5:3 FTCA	4:2 FTUCA	6:2 FTUCA	8:2 FTUCA	10:2 FTUCA	6:2 FTCA	8:2 FTCA	10:2 FTCA	6:2 FTUA	8:2 FTU A	10:2 FTA	PFH xSi	PFO Si	6:2 FTAB	6:2 FTA	Me FOS E	Et FOSE
Reinikainen et al., 2019, 2022	ELCI		0,11-160	3-3,2																							
Miljõmini steriet, 2014	ELCI, IU,		<LQ																								
Houtz et al., 2013	ELCI		<LQ																								
PROMIS CES, 2023	ELCI	0-6,29																									
Anderson et al., 2016	IU ZS ZEM		0,016-0,83 0,0069-380 4,6-5																								
Nickerson et al., 2021; Adamson et al., 2022	ELCI ELCI ZS et, ELCI	<LQ	1,1-930 57-780	<LQ <LQ	11-26 <LQ	60-690 <LQ	<LQ <LQ	<LQ <LQ	42-410 27-440		<LQ <LQ					48-48 <LQ						1,3-860 24-2100	1,4-810 160	1-900 63-24000	1-870 12-1200		
AVINOR 2012a, b (SFT, 2008)	ELCI ELCI		<70,5	<6	<70,5																					<2,7	<2,7
Hoisæter et al., 2019	ELCI																										
Ahrens et al., 2015	ELCI		0,02-0,02																								
Dauchy et al., 2019	ELCI		<500	<100	<100	<50 0	<500	<500					<500	<500	<500	<100	<100	<500						<25-362	<25		
Filipovic et al., 2015	ELCI, IU, ZS																										
Kwadijk et al., 2014	F																										
Bräunig et al., 2017	ELCI																										
Liu et al., 2021	ELCI	500	200-17100	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	700-1000		400-3100											0-2400	0-1000	700-93200			

ELCI : zone de formation/d'entraînement à la lutte contre les incendies. ZS : zones de stockage d'AFFF. ZEM : Zones d'essais et maintenance du matériel de lutte contre les incendies. IU : interventions d'urgence (ex : incendies). F : fuite d'AFFF.

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Tableau A2 : Gamme de concentration (µg/kg) des PFAS recherchés dans les sols des sites d'utilisation d'AFFF. En, gris foncé, les substances mesurées au-dessus de la limite de quantification (LQ).

Etude	PFPrA	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUdA	PFDoA	PFTTrD	PFTeD	PFHxDA	PFODA	PFPrS	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFDoS	4:2 FTSA	6:2 FTSA	8:2 FTSA	
Reinikainen et al., 2019, 2022	ELCI	0,072-4,6	0,14-7,3	0,067-15	0,56-1,4	0,052-22	0,084-35	0,09-66	0,11-130	0,066-63	0,05-260	0,24-32	0,22-15	0,55-0,55		0,054-2,8		0,15-14	0,22-6,5	2,2-2000		0,10-98		0,012-0,037	0,033-110	0,047-0,71	
Houtz et al., 2013	ELCI	0-410	0-1300	0-2000	0-320	0-5200	0-20									0-610		0-13000	0-430	0-20000					0-6200	0-800	
PROMISCE S, 2023	ELCI	<LQ	0-1,69	0-1,84	0-0,95	0-3,76	0-0,59	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		0-2,86	0-0,27	0-2,76	0-1,65	0-17,80	<LQ	<LQ	<LQ			0-6,33	
Anderson et al., 2016	IU	0,52-11	0,35-15	0,21-47	0,39-8,4	0,26-29	0,5-4,1	0,54-11	0,43-2,8	1,6-6,3	0,41-1,7	0,92-1,3				0,51-79		0,37-520		0,78-870		0,45-39					
	ZS	0,15-31	0,25-38	0,15-100	0,14-17	0,25-110	0,21-12	0,25-15	0,33-5,2	0,76-7,3	0,1-4,6	0,78-5,4				0,15-52		0,34-1300		0,21-9700		0,35-280					
	ZEM	0,23-14	0,24-50	0,19-140	0,14-6,8	0,26-140	0,24-23	0,29-6,9	0,38-10	0,92-18	0,4-6,4	1-4,7				0,2-72		0,29-180		0,38-5700		0,44-160					
Nickerson et al., 2021;	ELCI	0,34-18	0,18-35	0,087-98	0,045-21	0,18-536,24	0,073-40,63	0,026-9,304	0,024-4,7	0,03-1	0,079-0,6	0,014-0,028	<LQ		0,072-7,7	0,018-36,94	0,0081-35	0,04-811,61	0,015-87,56	0,45-3859,57	0,075-52,78	0,022-12	0,32-9		0,14-260,79	0,027-200	
Adamson et al., 2022	ELCI	3,22-67,38	1,58-379,94	0,38-462,88	0,09-146,8	0,11-226,34	0,1-41,26	0,45-5,41	0,03-2,73	0,06-1,6	0,02-0,23	<LQ	<LQ		0,02-89,54	0,03-255,64	0,11-191,14	0,12-1260,77	0,08-125,11	0,6-8839,35	0,31-225,63	0,22-329,64	0,67-20,89	<LQ	1,57-311,02	0,2-179,94	
	ZS et, ELCI	0,94-2,58	0,63-3,11	0,11-9,93	0,11-3,13	0,28-32,12	0,03-3,19	0,06-5,41	0,04-2,33	0,07-0,54	0,09-0,2	<LQ	0,06-0,12		0,03-0,89	0,04-3,42	0,06-5,33	0,06-71,55	0,07-8,75	0,59-1950,55	0,07-104,61	0,06-90,65	0,13-79,35	<LQ	3,15-26,95	0,07-190,15	
AVINOR, 2012a, 2012b	ELCI					<1,7-90																				<2,5-243	
SFT, 2008	ELCI			<3,2-133,4	<1,2-65	<1,6-141,5	<1,1-16,7	<0,7-43,8	<0,7-44,5	<0,7-27,3	<0,7-10,3	<0,9-2,6				<1-45,4		<1,5-697		28,6-8924		<1,1-57,4				<13,8-2365	
	ELCI			<2,9-113	<1,2-39,9	<1,3-101	<1,1-39,9	<0,7-25,8	<0,7-327	<0,7-49,3	<1,4-369	<0,8-23,5				<0,9-118		<1,3-465		24,5-1439		<0,9-23,5				<12,6-1090	
	ELCI			<3,9	<1,9	<1-3,8	<1,9	<0,9	<1,9	<0,9	<0,9	<1,2				<0,8-3,4		<1,3-38,3		30,1-413		<1,9				<21,5	
	ELCI			<2,8-8,7	<2,0-23,2	<1,8-46,9	<0,9-37,7	<1,1-6,9	<1,2-232	<1,1-5,8	<1,4	<0,16				<1,5-8,7		<1,8-135		110-11923		<0,9-9,8				<21,9-2155	
Høisæter et al., 2019	ELCI																										<0,3-6500
Dauchy et al., 2019	ELCI	<2-42	<2-36	<2-142	<2-52	<2-514	<2-252	<2-100	<2-155	<2-35	<2-82					<2-101		<2-2344	<2-2494	<2-55197		<2-69		<2-126	<2-3702	<2-4073	
Filipovic et al., 2015	ELCI, IU, ZS			<1,5-13,3		<0,3-287												<0,02-21,3		<0,5-555							
Bräunig et al., 2017	ELCI	<0,1-3	0,2-5,2	<0,2-26	<0,2-2	<0,1-7	0,55-0,55	<0,1-0,7								<0,1-6,0		<0,1-74,0		2,3-1692							
Kärman et al., 2011	ELCI		0,52-28,0	0,18-18,5	0,19-6,7	0,23-12,2	0,4-6,4	<1,0-1,0	<LQ	<0,1-3,7	<0,1-5,8	<0,1-0,32	<0,1-0,3			<0,11-1,8		0,12-17		1,6-1905		<0,10-54				0,84-2101	
Liu et al., 2021	ELCI	0,01-2,82	0,24-7,16	0,02-15,8	0,02-42,95	0,01-6,03	0,01-9,49	0,01-13,77	0,01-15,83	0,01-8,3	0,02-8,99	0,01-1,06	0,02-1,33	0,01-0,17		0,09-4,39	0,01-10,28	0,01-14,15	0,01-203,14	0,01-14,92	0,09-2233,48	0,03-28,86	0,01-18,62	0,04-5,18	0,01-47,09	0,11-589,84	4,04-1684,4

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Etudes	Activités	10:2 FTS A	FOSA	Et FOSA	Me FOSA	FOSA A	Me FOSAA	Et FOSA A	Cl-PFOS	Cl-PFNS	5:3 FTCA	4:2 FTUCA	6:2 FTUCA	8:2 FTUCA	10:2 FTUC A	6:2 FTCA	8:2 FTCA	10:2 FTCA	6:2 FTUA	8:2 FTUA	10:2 FTA	PFH xSi	PFO Si	6:2 FTAB	6:2 FTA	Me FOSE	Et FOSE
Reinikainen et al., 2019, 2022	ELCI		0,065-600	0,48-0,71																							
Houtz et al., 2013	ELCI		0-3400																								
PROMISCE S, 2023	ELCI																										
Anderson et al., 2016	IU		0,12-9,8																								
	ZS		0,1-160																								
	ZEM		0,11-620																								
Nickerson et al., 2021;	ELCI	0,039-1,63	0,04-47,55	0,018-0,404	0,052-0,57		0,15-3,4	0,026-0,75	0,025-13,79	<LQ										0,6-1,3	<LQ	<LQ	0,03-4,83	0,01-0,18			
Adamson et al., 2022	ELCI	1,04-1,04	0,15-57,35	<LQ	0,43-0,43	0,26-0,81	0,1-7,68	ND	0,17-2,36	<LQ										0,56-0,56	<LQ	1,09-1,09	0,2-5,81	2,05-2,05			
	ZS et, ELCI	0,08-1,42	0,2-19,34	0,63-4,86	<LQ	3,93-9,53	0,07-12	2,55-111,32	0,1-0,27	<LQ		<LQ								<LQ	0,24-0,24	0,08-4,85	0,049-10,4	3,41-6,48			
AVINOR, 2012a, 2012b	ELCI																										
SFT, 2008	ELCI		<21,4-34,5	<2,3	<0,9-1,4																				<4,3	<1,9	
	ELCI		<23,8-283	<1,3-7	<1,1																				<2,5-23,2	<2,7	
	ELCI		<28,9	<1,9	<1,2																				<2,5-7,8	<1,6	
	ELCI		<21,2-966	<2,6	<0,8-1,6																				<4,7	<2,4	
Høisæter et al., 2019	ELCI																										
Dauchy et al., 2019	ELCI		<2-2424	<2-<20	<2-<20	<2-<20	<2-<20	<2-<20					<2-25	<2-53	<2-23	<2-<20	<2-17	<2-<20						<2-6313	<2-7074	38	
Filipovic et al., 2015	ELCI, IU, ZS																										
Bräunig et al., 2017	ELCI																										
Kärmmann et al., 2011	ELCI																										
Liu et al., 2021	ELCI	0,11-46,87	0,01-101,47			0,04-4,92	4,63	<LQ	0,1-2,67			0,04-5,98											0,01-2,63	0,02-0,69	0,01-918	0,02-21,32	

ELCI : zone de formation/d'entraînement à la lutte contre les incendies. ZS : zones de stockage d'AFFF. ZEM : Zones d'essais et maintenance du matériel de lutte contre les incendies. IU : interventions d'urgence (ex : incendies).

État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie

Tableau A3 : Gamme de concentration (µg/kg) des PFAS dans les sédiments des sites d'utilisation d'AFFF. En, gris foncé, les substances mesurées au-dessus de la limite de quantification (LQ).

Etude	Activités	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUDA	PFDoA	PFTrDA	PFTeDA	PFHxDA	PFODA	PFPrS	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFDoS	4:2 FTSA	6:2 FTSA	8:2 FTSA
Reinikainen et al., 2019, 2022	ELCI	0,88	0,72-2,5	2,0-3,4	0,56-1,4	1,3-2,3	8,4-22	0,59-1,4	32-81	1,5-5,7	36-230	1,2-5,1	0,29-1,1	<LQ		0,18-0,47		1,6-3,0	0,19-0,47	37-80		0,35-1,3		0,021-0,049	8,4-23	12-34
Ahrens et al., 2015	ELCI																									
Anderson et al., 2016	IU	0,52-11	<LQ	0,85-1,6	0,9-1,8	9,1-20	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ			<LQ		<LQ		0,9-0,9		<LQ					
	ZS	0,15-13	0,28-38	0,18-100	0,14-17	0,25-110	0,27-5,7	0,34-9,4	0,46-2,0	1,1-5,1	0,46-4,6	1,2-5,4			0,15-29		0,34-340		0,21-660		0,35-56					
	ZEM	0,35-14	0,24-50	0,23-140	0,24-6,8	0,54-140	0,61-7,8	0,42-0,42	<LQ	2,4-5,1	0,6-4,7	2,3-5,4			0,3-72		0,29-180		0,38-1700		0,55-18					
(AVINOR, 2012b, c)	ELCI					<1,7-2,0																			3-3	
(SFT, 2008)	ELCI			50,2-289	6,2-101	31,3-309	<2,1-14,3	<0,7-8,6	<0,7-3,1	<0,7-8,6	<0,8	<1,1			98,1-688		702-2849		7375-47743		18,8-135				<21,5	
	ELCI			<0,05	<0,05	<0,07	<0,17	<0,06	<0,02	<0,03	<0,17	<0,05			<0,5		<0,2		<0,3-64,1		<2,2				<6,9	
Kärman et al., 2011	ELCI	0,37-0,91	<0,6-1,6	<0,1-0,32	<0,75	<3,2	<LQ	0,56-26,0	<0,11-0,96	<0,1-11	<0,36				<0,10-0,17		0,7-2,6		35-88		<0,13-1,7				1,5-9,8	
Kwadijk et al., 2014	F														<0,3		<0,6		6,5-16							

Etude	10:2 FTSA	FO SA	Et FOSA	Me FOSA	FOSAA	Me FOSAA	Et FOSAA	Cl- PFOS	Cl- PFNS	5:3 FTCA	4:2 FTUCA	6:2 FTUCA	8:2 FTUCA	10:2 FTUCA	6:2 FTCA	8:2 FTCA	10:2 FTCA	6:2 FTUA	8:2 FTUA	10:2 FTA	PFH xSi	PFO Si	6:2 FTAB	6:2 FTA	Me FOSE	Et FOSE
Reinikainen et al., 2019, 2022	ELCI	0,8-2,8	0,13-0,34																							
Ahrens et al., 2015	ELCI	n.c.																								
Anderson et al., 2016	IU	<LQ																								
	ZS	0,1-160																								
	ZEM	0,11-150																								
(AVINOR, 2012a, 2012b)	ELCI																									
SFT, 2008	ELCI	<27	<1,8	<1,1																					<3,3	<1,7
	ELCI	<0,2	<0,3	<0,2																					<0,3	<0,3
Kärman et al., 2011	ELCI																									
Kwadijk et al., 2014	F																									

ELCI : zone de formation/d'entraînement à la lutte contre les incendies. ZS : zones de stockage d'AFFF. ZEM : Zones d'essais et maintenance du matériel de lutte contre les incendies. IU : interventions d'urgence (ex : incendies). F : fuite d'AFFF. <LQ: limite de quantification.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm