



Etude de la contamination et des transferts des PFAS dans l'environnement au voisinage de sites producteurs

2025



Le présent rapport est publié sous licence CC-BY-ND

Les données, les interprétations et les images présentes dans ce rapport sont la propriété de l’Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions et de ses partenaires (LCE, ABO-ERG, IMBE), libres d'accès et d'utilisation à condition de citer les références du rapport et d'indiquer la source des données, photos, et graphiques ("Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions").

Il ne sera pas apporté de modifications à la version originale du rapport à des fins de diffusion. L’Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions ne pourra être tenu responsable de toute interprétation réalisée par un tiers et qui n'est pas explicitement détaillée dans ce rapport.

Pour citer ce rapport :

Annabelle Austruy. Etude de la contamination et des transferts des PFAS dans l'environnement au voisinage de sites producteurs - Rapport d'activité. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 2025.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce projet.

Nous adressons nos remerciements à Mr le Maire de Oullins-Pierre-Bénite pour l'autorisation d'accès et de prélèvements au stade du Brotillon, sélectionné comme site atelier.

Nous remercions l'ensemble des partenaires du projet MATISSE (LCE, IMBE et ABO-ERG) auquel est associé ce travail.

Enfin, nous remercions la Métropole du Grand Lyon pour le financement de ce travail et son accompagnement dans la réalisation de cette étude.

Ce travail a été réalisé en partenariat avec



Table des matières

1	Introduction.....	6
2	Etude multi-matrice sur site atelier.....	8
2.1	Présentation du site atelier.....	8
2.2	Plan et méthode d'échantillonnage.....	9
2.3	Prétraitement des échantillons.....	11
2.4	Analyse des différentes matrices environnementales prélevées.....	12
2.5	Premiers résultats.....	13
2.5.1	Teneurs en PFAS dans les sols.....	13
2.5.2	Teneurs en PFAS dans les eaux souterraines.....	16
2.5.3	<i>Teneurs en PFAS dans les végétaux.....</i>	17
3	Exposition atmosphérique en PFAS.....	20
3.1	Principe de la biosurveillance lichénique.....	20
3.2	Présentation des sites d'étude.....	21
3.3	Prélèvements et pré-traitements des échantillons.....	24
3.4	Analyses des PFAS.....	25
3.5	Premiers résultats.....	26
4	Conclusion et perspectives.....	29
5	Bibliographie.....	30
6	Liste des Annexes.....	34

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation du site atelier et de l'usine Arkema à Oullins-Pierre-Bénite.....	9
Figure 2 : Carte d'échantillonnage des zones d'étude A et B décrites sur le site atelier (sols, sondages, végétaux et eaux souterraines).....	10
Figure 3 : Cartographie des teneurs totales en PFAS relevées à la surface du sol du site atelier à Oullins-Pierre-Bénite.....	14
Figure 4 : Concentrations en ng/g de MS correspondant à la somme de PFAS par famille relevées en moyenne dans les sols de surfaces (échelle logarithmique - n=14)	15
Figure 5 : Evolution des teneurs totales en PFAS avec la profondeur relevée dans les sondages A et B.....	15
Figure 6 : Teneurs en PFAS dans la nappe souterraine en amont (PzHS07) et en aval (PzHS01) du site industriel ARKEMA.....	16
Figure 7 : Localisation des sites de prélèvements de lichen <i>X. Parietina</i> sur la Métropole du Grand Lyon.....	22
Figure 8 : Condition météorologique en 2024, année de prélèvements des lichens dans le sud lyonnais (Meteoblue – Station Lyon - Saint-Priest).....	23

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Liste des échantillons collectés sur le stade de Brotillon, Oullins-Pierre-Bénite.....	11
Tableau 2 : Somme des concentrations (ng/g MS) des 47 PFAS et nombre de congénères quantifiés pour chaque point de prélèvement répartis sur le site atelier.....	13
Tableau 3 : Concentrations ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MS) pour chaque congénère PFAS mesurées dans les échantillons végétaux prélevés sur le point A7 et limite de quantification (LQ).....	18
Tableau 4 : Description des sites d'étude de biosurveillance lichénique.....	22
Tableau 5 : Concentrations en ng/g MS des congénères PFAS dans les lichens sur 3 sites d'étude du sud lyonnais et comparaison avec les niveaux enregistrés sur la MAMP.....	27

1 Introduction

Les composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS) font l'objet d'une préoccupation croissante de la part des communautés scientifiques. Il s'agit d'une classe de composés organiques synthétiques très stables utilisés dans une grande variété d'applications industrielles et commerciales (Buck et al., 2011). Ils sont produits de manière industrielle à partir des années 1940 aux Etats-Unis, et ont connu un second essor dans les années 1960 avec le développement de l'AFFF, une mousse filmogène aqueuse utilisée pour l'extinction des incendies. Par la suite, leurs utilisations à travers le monde n'ont cessé de s'accroître (textile, revêtement anti-adhésif, emballages alimentaires, ...) en raison de leurs multiples propriétés (antiadhésifs, imperméabilisants, résistants aux fortes chaleurs) (Wang et al., 2023). L'Agence européenne des produits chimiques, ECHA, estime que 4,5 millions de tonnes ont été émises en 30 ans dont 75 000 tonnes uniquement en 2020 (ECHA, 2025). Ces polluants suscitent de plus en plus d'inquiétudes du fait de leurs impacts sur la santé et les écosystèmes, associés à leur extrême persistance dans l'environnement s'expliquant par la très grande stabilité de la liaison carbone-fluor (Teymoorian et al., 2025)

Les premiers cas de pollution par les PFAS ont été identifiés dans les années 1990, aux États-Unis (Wang et al., 2023). Environ 17 000 sites contaminés sont recensés (Salvatore et al., 2022), les pays les plus concernés sont l'Allemagne, la Suède, la Belgique, la Norvège, les Pays-Bas et la France. En France, le sujet a été médiatisé et priorisé à partir de 2022 à travers les problématiques en PFAS relevées dans la région lyonnaise avec la mise en évidence de pollutions aux substances perfluorées dans le réseau d'eau potable, la nappe souterraine et les sols (Lauverjat, 2022).

Pour améliorer la connaissance sur ces substances et développer les méthodes d'analyse, le projet de recherche MATISSE, intitulé « Étude de contamination multi-échelle par les PFAS en zones industrielles » et soutenu par Aix-Marseille Université, est développé par un consortium regroupant l'Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP), le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE), coordinateur, l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE), le bureau d'étude ABO-ERG Environnement et la fondation ABO avec pour objectif de répondre à 3 grandes questions scientifiques :

- OCCURRENCE : Quels sont les PFAS que l'on retrouve dans les eaux souterraines, eaux potables et lichens ? Y a-t-il des différences entre un site d'utilisation (Fos-Berre) et un site de production (Oullins-Pierre-Bénite) ?

- EXPOSITION : Quels sont les modes d'exposition actuels de la population des zones industrielles aux PFAS réglementés, non réglementés et émergents ainsi qu'aux mélanges contenant des PFAS (principales voies de transfert) ?
- TOXICITE : Quels sont les effets d'exposition chronique à des mélanges complexes contenant des PFAS à des concentrations environnementales sur l'animal et sur la santé humaine ?

La Métropole de Lyon s'engage de manière volontaire dans une stratégie d'amélioration de la connaissance, de suivi de la pollution aux PFAS, de prévention et de protection de la population, et ce pour pouvoir porter un dialogue auprès de l'État compétent en matière de réglementation et contrôle. Ainsi, la Métropole de Lyon et l'IECP ont décidé d'un commun accord de mener en 2024 un programme de recherche et de développement partagé visant à identifier et attribuer l'origine des imprégnations aux PFAS des populations exposées dans le sud lyonnais, et à déterminer les effets de ces contaminations sur la santé. Ce programme se compose de deux approches complémentaires, visant à développer une connaissance complète et aussi large que possible du comportement et des champs d'action des PFAS, depuis leurs sources jusqu'aux organismes humains :

- un volet sanitaire, qui consiste à mesurer les niveaux d'imprégnation sanguine des habitants de ces territoires (étude PERLE/PERFAO) ;
- un volet environnemental, qui consiste à étudier la contamination des milieux où vivent et travaillent ces personnes (en lien avec le projet MATTISE).

Le traitement des données issues de l'étude environnementale permettra de déterminer les voies de transfert des PFAS au sein de différents compartiments environnementaux, en réalisant simultanément des investigations transversales sur l'air, les eaux et les sols. Cette étude permettra également d'étudier en situation réelle le comportement de ces polluants encore très peu connus, et les potentielles sources d'exposition des populations. Le travail réalisé dans le sud lyonnais, représentatif d'une zone dite de « sites producteurs » sera lié à une recherche de même nature réalisée au niveau de la zone Fos-Berre, zone dite de « site utilisateur », dans le cadre du projet MATTISE.

Ce rapport présente les travaux réalisés en biosurveillance lichenique dans le sud lyonnais pour caractériser l'exposition de ces territoires en PFAS ainsi que l'étude menée sur un site atelier contaminé en PFAS situé à Oullins-Pierre-Bénite.

2 Etude multi-matrice sur site atelier

2.1 Présentation du site atelier

La zone d'échantillonnage se situe au stade du Brotillon, localisé à Oullins-Pierre-Bénite au sud-ouest de Lyon (Figure 3), à proximité immédiate du site SEVESO seuil haut de l'usine Arkema. L'accès et les prélèvements sur ce site ont été autorisés par Mr le Maire de Oullins-Pierre-Bénite à travers un arrêté municipal (ODP2025-PV02). Implantée sur la rive droite du Rhône, la zone d'étude couvre une superficie d'environ 37 000 m², correspondant à la parcelle cadastrale 0205C.

Cette zone se trouve sur les formations géologiques suivantes :

- Une formation d'alluvions fluviatiles modernes sablo-caillouteuses et polygéniques. L'épaisseur des alluvions est comprise entre 21 m à Saint-Fons pour atteindre de manière graduelle 35 m vers Givors.
- Le substratum des alluvions est constitué de granit ou de grès fins à ciment calcaire pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.

La nappe alluviale se situe à une profondeur de 5 m sous la surface du sol (Ramboll, 2023).

Ancienne zone humide comblée par des remblais dans les années 50-60, les terrains de sport ont été installés à partir de 1969. Proche de l'autoroute A7 et du Rhône, en bordure d'une zone densément peuplée, il accueille de nombreux groupes scolaires et plusieurs clubs de sport (football, athlétisme). Ainsi, le site regroupe un terrain de sport enherbé et un terrain en synthétique, une piste d'athlétisme, une aire de sauts, une aire de lancer, une salle de musculation et une aire de jeux/pique-nique.

Ce secteur a été spécifiquement choisi en raison de son exposition directe aux rejets industriels, notamment aux substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) dont une ancienne unité de production est localisée au sud-ouest du site industriel. Dans le détail, l'historique de l'utilisation des composés per-fluorés par la plateforme industrielle ARKEMA-DAIKIN est le suivant :

- Utilisation du 6:2 FTS de 1973 jusqu'en 2024 (unité de production au sud-est de l'usine ARKEMA, proche du stade du Brotillon) ;
- Utilisation du PFHxA jusqu'en 2025 ;
- PFNA, PFUnDA, PFTDA et PFOA ont été utilisés de 2003 à 2015 ;
- Une première utilisation de PFOA est signalée entre 1965 et 1986.

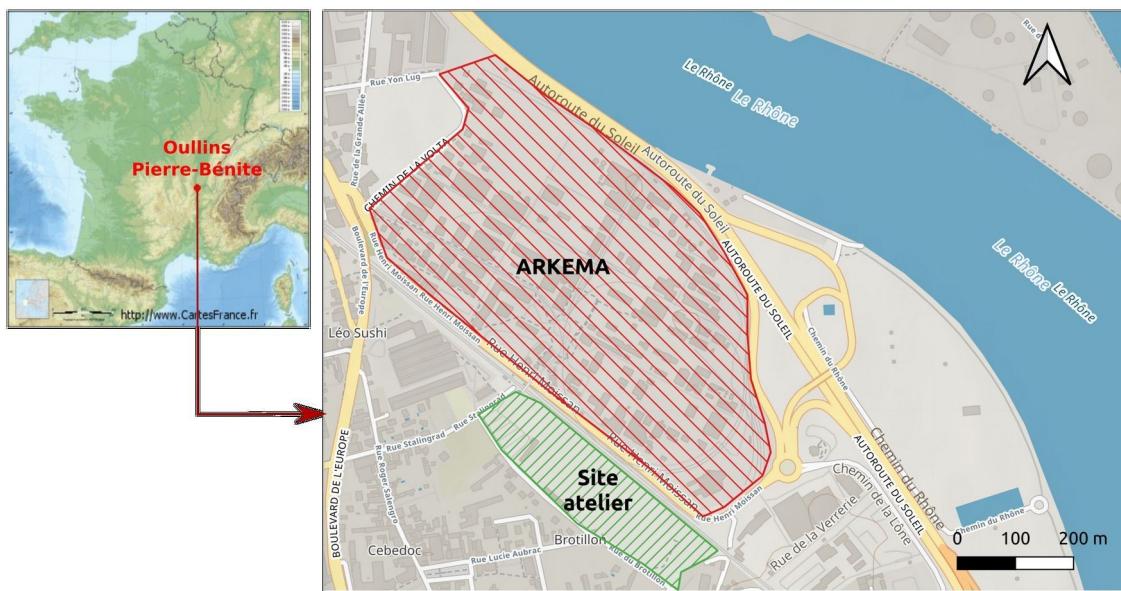


Figure 1 : Localisation du site atelier et de l'usine Arkema à Oullins-Pierre-Bénite

2.2 Plan et méthode d'échantillonnage

Le site d'étude a été subdivisé en deux zones distinctes d'échantillonnage, A et B (Figure 1). Celles-ci sont composées d'un terrain relativement plat avec une végétation herbacée dominée par les Poaceae (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Agrostis sp.*, ...), les Fabaceae (*Trifolium sp.*, *Vicia sativa*) et les Asteraceae (*Taraxacum officinale*, *Bellis perennis*, ...).

Au total, 12 échantillons de sols de surface ont été prélevés à la tarière manuelle entre 0 et 12 cm de profondeur (Figure 2). Sur la zone A, deux transects espacés de 30 m ont été réalisés avec 4 points de prélèvements par transect répartis tous les 30 m. Sur la zone B, 4 prélèvements aléatoires ont été effectués. Une masse brute d'environ 700 g de sol a été prélevée pour chaque point, puis homogénéisée sur le terrain avant conditionnement dans des flacons en PEHD propres, étiquetés et conditionnés à 4 °C.

Pour déterminer la répartition des PFAS dans le profil de sol, un carottage avec une sondeuse geoprobe (Geoprobe 7822DT) a été opéré sur chaque zone A et B jusqu'à 4,8 m de profondeur. La description des profils de sol et des différents horizons identifiés dans chaque carottage est proposée en Annexe 3. L'ensemble des horizons de sol caractérisés dans les différents horizons ont été prélevés pour analyse. Au total, 8 échantillons d'horizons de sol ont été prélevés, 4 par carottage. Sur le terrain, ils ont été homogénéisés et conditionnés en suivant la même procédure que pour les échantillons de surface.

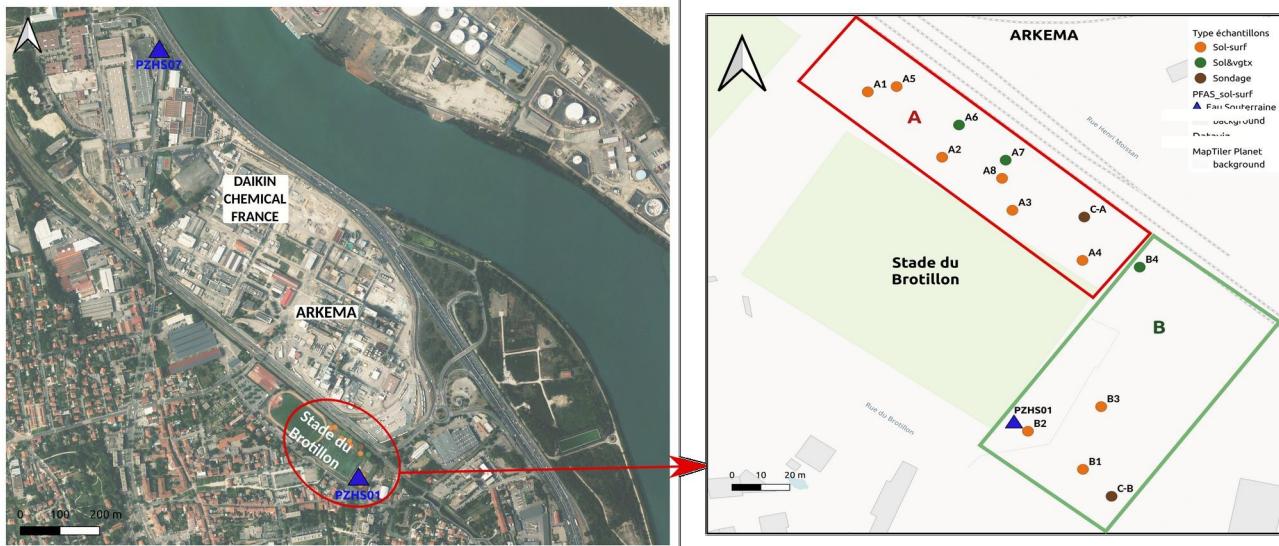


Figure 2 : Carte d'échantillonnage des zones d'étude A et B décrites sur le site atelier (sols, sondages, végétaux et eaux souterraines)

Pour compléter les prélèvements de sol, des végétaux ont été collectés dans la zone d'étude, dans le but d'évaluer la bioaccumulation des PFAS. Pour se faire, deux espèces végétales ont été sélectionnées :

- Une graminée (Poaceae), le ray-grass (*Lolium perenne*, RGF et RGR) : plante métallophyte tolérante couramment rencontrée sur les friches industrielles (Austruy et al., 2013) et très présente sur le site d'étude avec un recouvrement supérieur à 25 %.
- Une composée (Asteraceae), le pissenlit (*Taraxacum officinale*, CPF et CPR) : plante pionnière vivace comestible bien représentée aussi sur la zone d'étude.

Pour chaque espèce, 3 prélèvements ont été réalisés au point A6, A7 et B4 (Figure 2), les racines et feuilles ont été séparées, pour un total de 12 échantillons collectés. Environ 100 g de biomasse fraîche ont été prélevés pour chaque compartiment végétal. Les échantillons ont ensuite été conditionnés dans des sacs propres, étiquetés, puis conservés à 4 °C jusqu'au retour au laboratoire.

Enfin, deux prélèvements d'eaux souterraines ont été réalisés en période de hautes eaux, l'un en amont du site Arkema (piézomètre PzH07), et l'autre en aval, dans la partie B de la zone d'étude (piézomètre PzH01) (Figure 2). Ces prélèvements ont été réalisés sur des piézomètres installés par l'entreprise RAMBOLL dans le cadre d'un suivi annuel de la qualité des eaux souterraines à la demande de l'industriel ARKEMA. Ils ont été effectués à l'aide d'une pompe statique, puis conditionnés dans des flacons en polyéthylène haute densité (PEHD) d'un litre. Les flacons ont préalablement été rincés trois fois avec l'eau de prélèvement pour éviter toute contamination croisée. Une solution de stabilisation d'acétate d'ammonium (250 g/L) a été ajoutée avec un

volume de 4 mL par flacon à l'aide d'une micropipette, conformément au protocole analytique pour la préservation des PFAS. Une deuxième campagne de prélèvement sur les eaux souterraines a été organisée en période de basse eaux en septembre 2025.

Le nombre d'échantillons et le matériel utilisé pour chaque matrice sont regroupés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Liste des échantillons collectés sur le stade de Brotillon, Oullins-Pierre-Bénite

Matrice	Nombre d'échantillons	Matériel utilisé	Date de prélèvement
Eaux souterraines	2 piézomètres (PZHS07 et PZHS01) * 2 pas de temps	Pompe péristaltique, sonde multi-paramètres, flacons de 1L en PEHD, micropipette, solution de stabilisation, gants en nitrile	26/03/2025
Sols	12 sols de surface	Tarière manuelle, bacs en acier, pèle et flacons en PEHD, sac en PE, balance de terrain, mètre, piquets en bois, plaques en aluminium, gants en nitrile	26/03/2025
	2 carottes * 4 horizons	Carotteur mécanique (geoprob7822DT), liner en PVC, plaques en aluminium, gants en nitrile	27/03/2025
Végétaux	12 échantillons, 2 espèces et 2 tissus (F+R)	Couteau en céramique, sacs en PE, plaques en aluminium, gants en nitrile	26/03/2025

2.3 Prétraitement des échantillons

À leur arrivée au laboratoire de l'IECP, les échantillons d'eaux souterraines ont été directement transférés au LCE pour être analysés sous 2 semaines après dilution dans du méthanol acidifié et stockage à -20 °C.

En revanche les échantillons sols et végétaux ont été immédiatement stockés à -30 °C afin de préserver leur intégrité jusqu'à leur pré-traitement.

Pour les échantillons de sol, la première étape consistait à lyophiliser les échantillons de sol (-55 °C/0.035 mbar, Christ Alpha 1-4LD) jusqu'à une perte de poids inférieure à 5 % en 24 heures. Après lyophilisation, les sols sont homogénéisés afin de répartir uniformément les constituants, puis quartés en différentes fractions en fonction des analyses :

- Une fraction tamisée à 2 mm avec un tamis en acier pour l'analyse des PFAS, HAP et paramètres physico-chimiques (pH, capacité d'échange cationique CEC, carbone organique, azote total, salinité et granulométrie) ;
- Une fraction tamisée à 4 mm avec un tamis en acier pour les tests de lixiviation ;
- Enfin une fraction, préalablement tamisée à 2 mm, est broyée en particules fines dans un mortier en agate pour l'analyse des métaux.

Pour les végétaux, après rinçage à l'eau ultra pure et passage au bain ultrason pour les racines, les échantillons (feuilles et racines) ont été lyophilisés (-55 °C/0.035 mbar, Christ Alpha 1-4LD) puis broyés avec un broyeur à bille (type RESTSCH MM 400) équipé de billes et capsules en zirconium fonctionnant à une fréquence de 30 Hz/s pendant 90 secondes. La totalité des échantillons pré-traités est conditionnée dans des flacons en PEHD et conservée à -4 °C en attente des analyses. Seront analysés sur ces échantillons végétaux les PFAS, métaux et HAP.

2.4 Analyse des différentes matrices environnementales prélevées

La méthode a été développée pour 48 PFAS (Annexe 1) et différentes méthodes d'extraction et de purification ont été testées sur les sols.

Pour développer la méthode d'extraction des sols, les tests ont été réalisés sur des masses de sol de 1 g dopées à 0,5 ng/g en 48 PFAS cibles et 3 étalons de suivi d'extraction marqués isotopiquement ($^{13}\text{C}_8\text{-PFOA}$, $^{13}\text{C}_8\text{-PFOS}$, IS D₃-N-MeFOSAA). Ne disposant pas de matrice blanche, des sols non dopés en PFAS cibles ont été extraits en simultané afin de soustraire les PFAS initialement présents dans le sol. Après dopage, les échantillons ont été homogénéisés à l'aide d'un vortex. La durée d'équilibration de l'échantillon est d'une heure. Chaque échantillon est soumis à trois cycles d'extraction constitués de l'ajout de 3,33 mL de solvant d'extraction (soit 10 mL au total) suivi d'une étape d'extraction puis de centrifugation à 4000 tr/min pendant 10 min. Le surnageant est récupéré à la micropipette et introduit dans un nouveau tube en PP. Le même process est répété deux fois et les extraits sont assemblés dans le même tube (environ 9,4 mL). Enfin vient l'étape de purification, 3 mL d'extrait est purifié sur une cartouche graphite ENVI-Carb, l'éluat est récupéré dans un nouveau tube à essai en PP (environ 2,5 mL d'éluat) puis concentré sous flux combiné d'air comprimé et d'azote à 52 °C, jusqu'à obtention d'un volume résiduel de 1 mL. Ce concentrat est transféré dans un vial, le tube est rincé avec 500 µL de MeOH qui est ensuite rajouté à l'extrait puis évaporé jusqu'à atteindre un volume final de 800 µL (volume vérifié par pesée).

Dans le but d'optimiser le protocole d'extraction, différents solvants ont été testés et soumis à une méthode par agitation ou par sonication. Au regard des résultats obtenus, le mélange MeOH + CH₃COONH₄ apparaît comme le solvant le plus adapté pour récupérer un nombre important de molécules avec de bons rendements. Dans le but d'optimiser le protocole d'extraction, une étape d'élution a été ajoutée au protocole avec 1 mL de MeOH + CH₃COONH₄ afin de désorber un

maximum d'analytes de la phase solide des cartouches de purification. Enfin, pour faciliter et réduire le temps d'extraction, une méthode par ultrason (15 min * 3 cycles) a été privilégiée. Avec ce développement analytique, 38 PFAS présentent un bon rendement (80 % - 120 %) et un faible effet matrice.

Pour les végétaux, le développement analytique est toujours en cours.

Pour l'analyse des PFAS, l'ensemble des échantillons (eaux, sols et végétaux) ont été analysés par chromatographie liquide ultra-haute performance couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (UHPLC-HRMS) sur un appareil SCIEX Triple Quad 7500, équipé d'une interface d'ionisation par électrospray (ESI). Les résultats d'analyse du 6:2 FTS sont non exploitables en raison de problème de contamination.

Des doublons d'analyses ont été réalisés par Eurofins sur l'ensemble des matrices afin d'assurer la qualité des mesures et de valider les développements analytiques effectués.

2.5 Premiers résultats

2.5.1 Teneurs en PFAS dans les sols

Tableau 2 : Somme des concentrations (ng/g MS) des 47 PFAS et nombre de congénères quantifiés pour chaque point de prélèvement répartis sur le site atelier

	Nombre de congénères quantifiés	Concentrations 47 PFAS (ng/g)		Nombre de congénères quantifiés	Concentrations 47 PFAS (ng/g)
A1	29	227,41	AH4	18	1,73
A2	29	244,90	AH5	13	0,12
A3	27	404,48	B1	28	103,55
A4	30	206,90	B2	28	143,04
A5	28	325,95	B3	24	182,71
A6	26	283,66	B4	32	159,19
A7	25	198,25	BH1	29	123,59
A8	29	346,05	BH2	27	9,01
AH1	24	328,83	BH3	17	12,93
AH3	12	0,64	BH4	19	2,49

Les concentrations en PFAS relevées dans les différents échantillons de sol prélevés sur le site d'étude à Oullins-Pierre-Bénite sont présentées dans le Tableau 2.

Des niveaux élevés, supérieurs à 100 ng/g sur l'ensemble des sols de surface sont relevés sur le stade du Brotillon et confirment les premières études réalisées à Oullins-Pierre-Bénite sur les niveaux de contamination importants des sols (ANSES, 2022). Les plus fortes teneurs sont mesurées sur la parcelle A, avec un maximum en PFAS totaux enregistré au point A3 (404,5 ng/g). Les teneurs les plus importantes semblent ainsi se concentrer sur les points les plus proches du site industriel (Figure 3) mettant en évidence l'influence de la proximité de la source d'émission sur les teneurs mesurées.

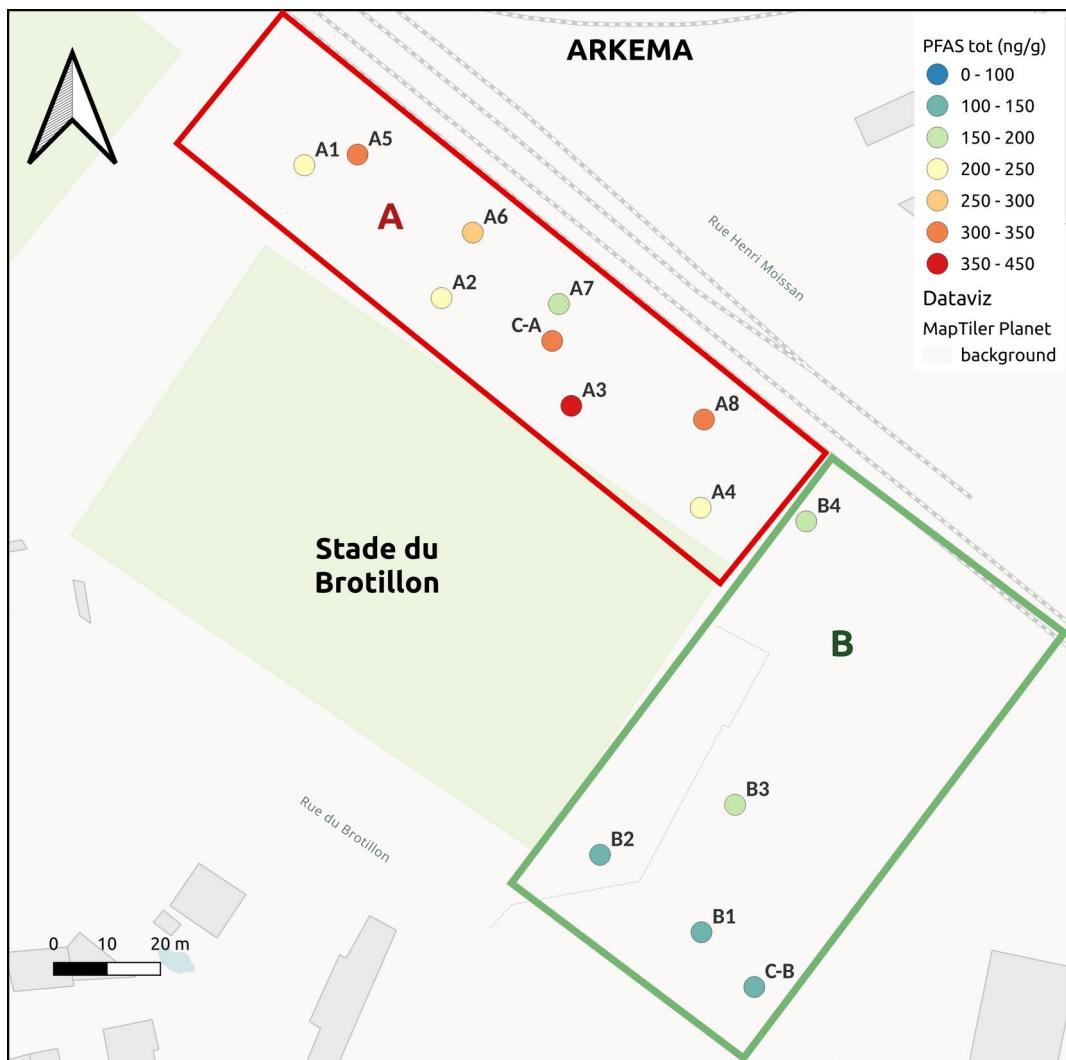


Figure 3 : Cartographie des teneurs totales en PFAS relevées à la surface du sol du site atelier à Oullins-Pierre-Bénite

La Figure 4 présente la répartition des congénères PFAS (ng/g MS) par famille (PFSA, PFCA, PFECA, PFESA, FTS, FASA, FASAA, diPAP et autres, Annexe 4) moyennée sur l'ensemble des sols de surface. On remarque que les PFCAs sont largement majoritaires sur tous les échantillons de surface du site. Le PFUnDA est largement majoritaire sur l'ensemble des sols de surface. Son utilisation sur le

site industriel pendant de nombreuses années semble avoir impacté l'environnement proche. Sont aussi relevés à des niveaux importants en surface, le PFTrDA, PFDODA, le PFHxD, le PFTeD et le PFDA, PFAS à chaîne longue. A noter que des teneurs plus élevées en PFOA et PFNA ont été mesurées dans les horizons inférieurs par rapport aux niveaux mesurés en surface. Ce résultat met en évidence une plus grande mobilité des PFAS à chaîne courte (PFOA, PFHpA et PFNA).

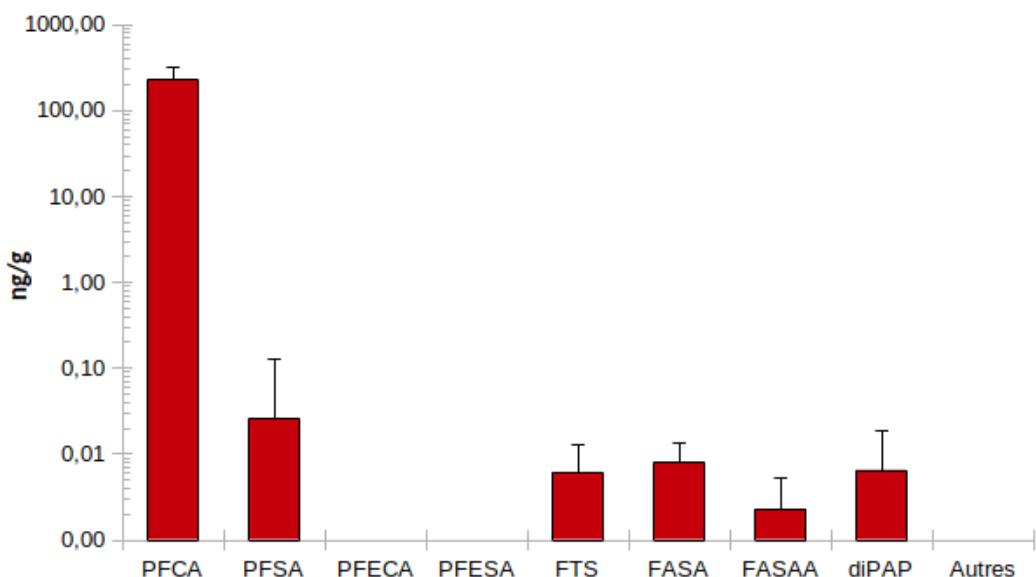


Figure 4 : Concentrations en ng/g de MS correspondant à la somme de PFAS par famille relevées en moyenne dans les sols de surfaces (échelle logarithmique - n=14)

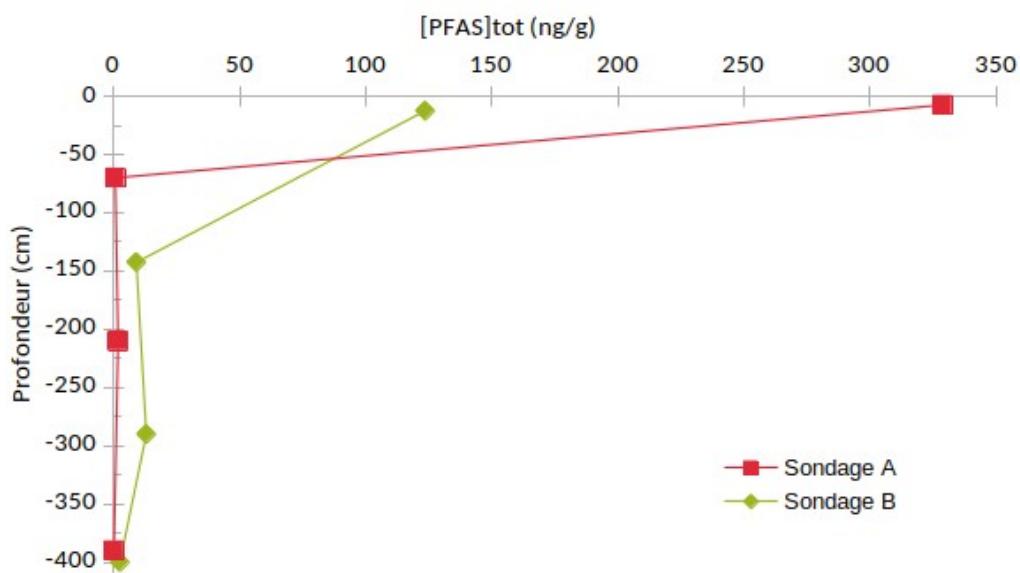


Figure 5 : Evolution des teneurs totales en PFAS avec la profondeur relevée dans les sondages A et B

L'évolution des concentrations avec la profondeur (Figure 5) met en évidence une réduction drastique des teneurs en PFAS dans les horizons inférieurs semblant indiquer une faible lixiviation des PFAS dans le profil de sol. Cependant, comme relevé précédemment, certaines familles de congénères PFAS sont plus concentrées en profondeur (PFNA et PFOA) ce qui pourrait suggérer une capacité de lixiviation pour ces composés à chaîne courte et leur potentielle migration vers la nappe souterraine. De plus, dans l'horizon H3 du sondage B, une augmentation significative des concentrations est observée pouvant être la conséquence de remblais historiquement contaminés (Annexe 2) ou confirmer la capacité de transfert dans le profil de sol de certains composés PFAS.

2.5.2 Teneurs en PFAS dans les eaux souterraines

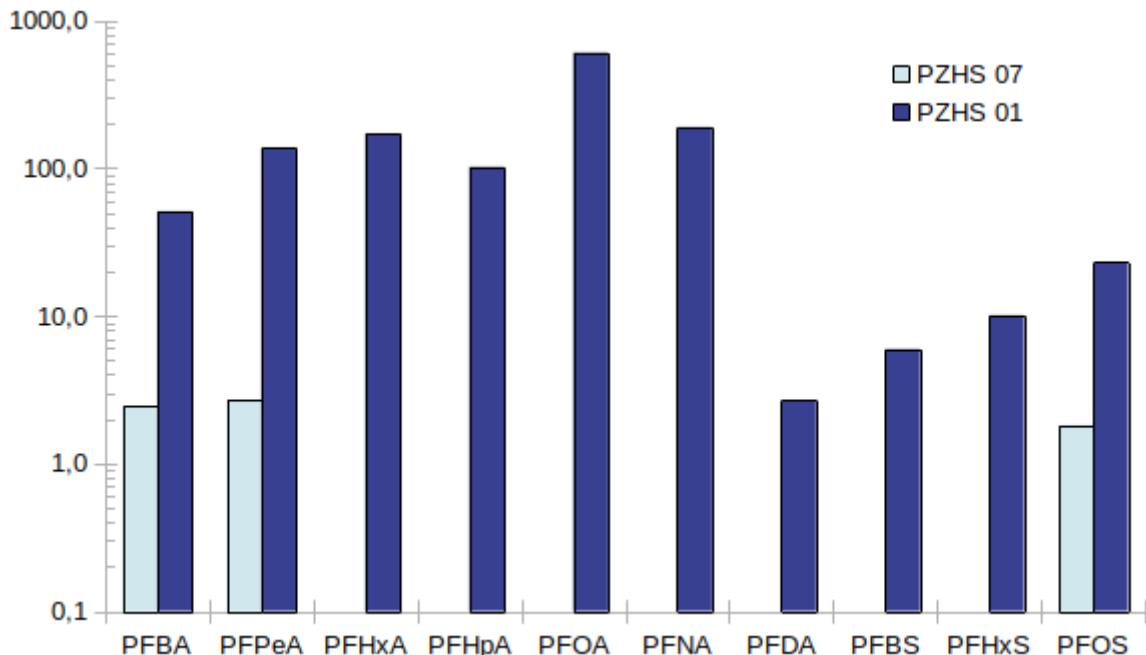


Figure 6 : Teneurs en PFAS dans la nappe souterraine en amont (PzHS07) et en aval (PzHS01) du site industriel ARKEMA

Les teneurs en PFAS relevées en période de hautes eaux (mars 2025) en amont et aval du site industriel ARKEMA sont présentées dans la Figure 6. Des niveaux très élevés et très largement supérieurs sont relevés à l'aval du site industriel (PZHS01 installé sur le site d'étude - 1300,8 ng/L) par rapport à l'amont (PZHS07 - 7,0 ng/L). Le PFOA, faiblement concentré dans les sols, est largement majoritaire dans la nappe à l'aval du site alors qu'il est non détecté en amont mettant en évidence un impact marqué du site industriel pour ce congénère. De même, le PFNA présente des niveaux élevés dans la nappe en aval du site industriel sous le site atelier. Ce résultat corrobore

la présence de ces deux composés à des niveaux plus élevés dans les horizons profonds des sols par rapport à la surface permettant d'émettre l'hypothèse d'une contamination des couches profondes du sol du fait d'une plus forte mobilité de ces PFAS à chaîne courte.

La présence en quantité significative des congénères PFAS relevés à l'aval du site alors qu'ils sont non détectés ou faiblement concentrés en amont permet de définir la signature des congénères PFAS potentiellement émis par le site industriel et met en avant son fort impact environnemental.

2.5.3 Teneurs en PFAS dans les végétaux

Les teneurs en PFAS dans les végétaux sont en cours d'analyse au LCE. Cependant, des premiers résultats sont disponibles à travers les analyses de contrôle réalisées par Eurofins. Celles-ci ont été menées sur les échantillons de végétaux prélevés au point A7 où la teneur totale en PFAS dans l'horizon de surface (0-15 cm) atteignait 193,3 ng/g. Les analyses ont porté sur les feuilles de ray-grass et pissenlit complétées par les racines du pissenlit. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Les concentrations totales en PFAS relevées varient de 2,57 dans les feuilles de pissenlit à 15,91 µg/kg MS dans les racines. Ces niveaux sont comparables aux concentrations en PFAS dans des cultures et plantes maraîchères relevées dans différents travaux menés récemment (Lasters et al., 2024 ; Costello et Lee, 2024).

La comparaison des teneurs en PFAS dans les racines et les feuilles de pissenlit semble indiquer un faible transfert des contaminants vers les feuilles avec un stockage préférentiel dans les racines. Des niveaux largement supérieurs sont enregistrés dans les feuilles de ray-grass par rapport au pissenlit pouvant traduire une capacité de bioaccumulation plus importante pour cette espèce.

Dans le détail, les congénères majoritaires dans l'ensemble des échantillons végétaux sont le PFUnDA et dans une moindre mesure le PFTDA et le PFNA, acides carboxyliques perfluorés à longue chaîne. Pour ces composés, qui présentent aussi des niveaux remarquables dans les sols, les concentrations les plus élevées sont relevées dans les racines du pissenlit mettant en évidence l'impact de la pollution diffuse des sols. Deux congénères, le PFBA et le PFHxA, présentent des niveaux plus importants dans les feuilles que dans les racines du pissenlit semblant indiquer une absorption par voie foliaire prédominante. Ce résultat est ainsi potentiellement consécutif à une exposition atmosphérique pour ces composés, notamment PFHxA produit et utilisé par la plateforme industrielle ARKEMA-DAIKIN jusqu'à fin 2025.

Tableau 3 : Concentrations ($\mu\text{g/kg MS}$) pour chaque congénère PFAS mesurées dans les échantillons végétaux prélevés sur le point A7 et limite de quantification (LQ) (Résultats Eurofins)

	LQ	Pissenlit racine	Pissenlit feuille	Ray-grass feuille
PFBA	0,3	<0,3	0,322	0,782
PFPeA	0,3	<0,3	<0,3	0,555
PFHxA	0,1	<0,1	0,395	0,651
PFHpA	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFOA	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFNA	0,1	1,110	0,135	1,280
PFDA	0,1	0,277	<0,1	0,247
PFUnDA	0,1	11,4	1,4	8,71
PFDodA	0,1	0,375	<0,1	0,287
PFTrDA	0,1	2,120	0,317	1,500
PFBS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFPeS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFHxS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFHpS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFOS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFNS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFDS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFUndS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFDodS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFTrDS	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
PFTeDA	0,3	<0,3	<0,3	<0,3
PFHxDA	0,1	0,282	<0,1	<0,1
PFODA	0,1	0,345	<0,1	0,126
4:2 FTSA	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
6:2 FTSA	0,3	<0,3	<0,3	0,726
8:2 FTSA	0,3	<0,3	<0,3	<0,3
10:2 FTS	0,5	<0,5	<0,5	<0,5
PFAS tot	-	15,909	2,569	14,864

A noter, les plus fortes concentrations en PFAS relevées dans les feuilles de ray-grass par rapport au pissenlit mettant en évidence sa capacité de bioaccumulation et son utilisation en tant que bioindicateur de la qualité des sols ou de l'air (De Temmerman et al., 2007 ; Xie et al., 2021), la biosurveillance de l'air par le ray-grass faisant aujourd'hui l'objet du norme (Norme NF X 43-901, Van Haluwyn et al., 2008).

Ces données seront prochainement complétées par les analyses sur l'ensemble des échantillons végétaux effectuées par le LCE et permettront d'évaluer plus précisément la capacité de bioaccumulation et de transfert des PFAS congénère par congénère.

3 Exposition atmosphérique en PFAS

3.1 Principe de la biosurveillance lichénique

La biosurveillance concerne toute utilisation d'un organisme, ou d'un ensemble d'organismes, sensible au milieu environnant et donc pouvant faire état de ce dernier (Van Haluwyn et al., 2011), soit par prélèvement direct depuis le milieu (bioindication passive) soit par transplantation d'échantillons (bioindication active) (Agnan, 2013). Ainsi, la biosurveillance repose sur l'idée que les organismes vivants réagissent de manières différentes aux variations de leur environnement et donc en reflètent les changements et les altérations. Elle se décline en plusieurs outils de diagnostic environnemental :

- Biointégration : observation de changements structurels au niveau d'une population/communauté en réponse à un stress environnemental ;
- Bioindication : observation des réponses biologiques (morphologiques, physiologiques, tissulaires...) d'un ou plusieurs organismes vivants en réponse à un polluant ;
- Biomarqueur : utilisation de marqueurs au niveau de la biologie structurelle ou fonctionnelle (enzyme, physiologie, protéine...) indiquant une influence du milieu environnant sur les fonctions biologiques ;
- Bioaccumulation : détermination des teneurs en éléments chimiques bioaccumulés dans un ou plusieurs organismes vivants en réponse à une exposition plus ou moins diffuse.

Ainsi, de nombreux végétaux peuvent être utilisés pour la biosurveillance de la qualité de l'air, soit parce qu'ils présentent des réactions biologiques caractéristiques en réponse à certains polluants, soit parce qu'ils accumulent des polluants de l'air environnant dans leurs tissus (Castell, 2009).

Les caractéristiques biologiques des lichens (absence de racines, absence de cuticules de protection, absence d'un système d'excrétion et activité quasi annuelle) les rendent fortement dépendants de l'atmosphère, les exposant ainsi aux polluants atmosphériques, mais peu ou pas dépendants des sols ni de leurs supports. La détermination des teneurs en éléments accumulés dans les lichens est réalisée depuis une vingtaine d'années (Nimis et al, 2002). Le mécanisme de bioaccumulation des polluants dans les lichens le mieux décrit à priori concerne les métaux. L'ensemble des éléments chimiques de l'atmosphère va être directement adsorbé par le thalle du lichen, avec un équilibre entre les concentrations atmosphériques et lichéniques. La méthodologie de prélèvement et de traitement des échantillons de lichens pour y mesurer la bioaccumulation de

polluants fait l'objet d'une norme, la NF X43-904 (AFNOR, 2013), intitulée « Biosurveillance de l'air

- Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide des lichens autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons ».

L'IECP a engagé depuis 2011 une biosurveillance lichénique complète sur le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence incluant la zone industrielo-portuaire (ZIP) de Fos ainsi que les villes alentour, afin d'établir une vision intégrée de la pollution de l'air à l'aide des lichens. Les résultats des différentes campagnes réalisées ont été rapportés en détails dans plusieurs documents écrits ces dernières années (Dron et al., 2016 ; Ratier et al., 2018 ; Dron et al., 2021 ; Durand et al., 2024). Le suivi réalisé depuis plusieurs années avec des campagnes de prélèvements effectuées tous les 3 ans depuis 2011 sur 30 à 50 sites répartis sur l'ensemble de la MAMP fournit une quantité d'informations conséquente, mettant en évidence d'importants contrastes d'accumulation de contaminants et différentes typologies suivant la localisation géographique des sites d'études (industriel, urbain-industriel, urbain, rural). Ainsi, la longue expérience de l'IECP et ses travaux de recherche dans le domaine ont permis de consolider certains aspects de la méthodologie (Ratier et al., 2018), d'évaluer la portée de sa fiabilité, ou encore de préciser la durée d'intégration des lichens en fonction des conditions climatiques (Dron et al., 2021).

3.2 Présentation des sites d'étude

Le territoire étudié couvre une partie de la Métropole du Grand Lyon et combine un paysage industriel marqué avec une urbanisation importante et des zones agricoles et viticoles à proximité. Il est donc au cœur de nombreux enjeux environnementaux et sanitaires.

Huit sites ont été sélectionnés sur la Métropole du Grand Lyon :

- 4 sites à Oullins-Pierre-Bénite potentiellement influencés par les émissions industrielles ;
- 1 site à Saint-Fons situé sur l'autre rive du Rhône par rapport à Oullins-Pierre-Bénite ;
- 1 site à Ternay en zone résidentielle dans le Parc des Sports ;
- 1 site à Givors éloigné des voies de circulation principales et proche de zones agricoles ;
- 1 site à Lyon en bordure du Rhône en zone densément urbanisée.

L'ensemble des sites excepté celui de la commune de Givors se situe à moins de 500 m de l'autoroute A7.

Le Tableau 4 et la Figure 7 présente la localisation précise des sites et leurs caractéristiques.

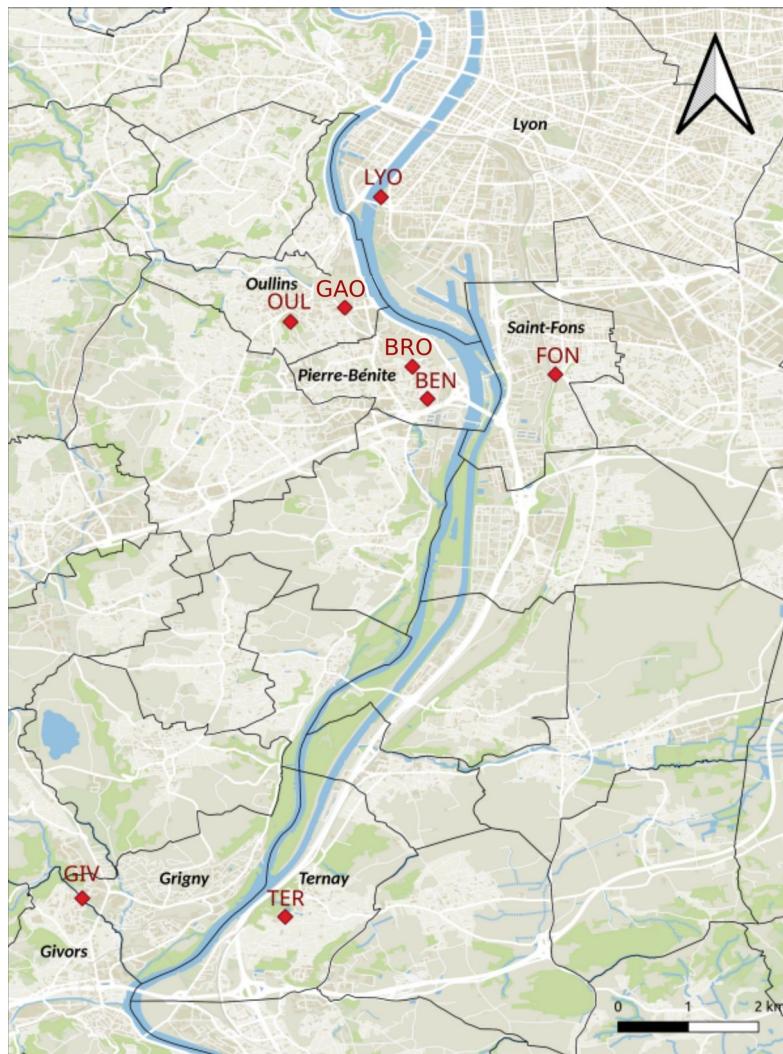


Figure 7 : Localisation des sites de prélèvements de lichen *X. parietina* sur la Métropole du Grand Lyon

Tableau 4 : Description des sites d'étude de biosurveillance lichénique

Code station	Commune	Latitude	Longitude	Distance site producteur PFAS (m)	Contexte
OUL	Oullins-Pierre-Bénite	45,711128	4,805873	1 740	Industriel-urbain
GAO	Oullins-Pierre-Bénite	45,714801	4,815447	1 300	Industriel-urbain
BRO	Oullins-Pierre-Bénite	45,703531	4,827882	275	Industriel-urbain
BEN	Oullins-Pierre-Bénite	45,698334	4,829982	890	Industriel-urbain
FON	Saint-Fons	45,704840	4,853210	2 000	Industriel-urbain
GIV	Givors	45,606710	4,767477	12 000	Urbain-agricole
TER	Ternay	45,602953	4,804788	11 600	Urbain-agricole
LYO	Lyon	45,736089	4,823345	3 350	Urbain

Ainsi, plusieurs sites de mesures sont situés dans la vallée de la chimie au sud de Lyon (GAO, BRO, OUL, BEN et FON), fortement industrialisée et qui abrite les installations de l'un des plus

importants sites de production de gaz fluorés en France. Cette vallée de près de 400 Ha regroupe par ailleurs, de nombreux groupes dans l'industrie de la chimie, de la pétrochimie et de l'incinération des déchets. A noter que le site BRO se situe sur le stade du Brotillon à Oullins-Pierre-Bénite, utilisé comme site atelier pour la réalisation de l'étude multi-matrice.

Les conditions météorologiques sur ce secteur correspondent à un climat océanique tempéré, avec quatre saisons bien contrastées. Après un début d'année 2024 relativement doux, le printemps 2024 a été relativement frais et pluvieux jusqu'au mois de juin 2024. Il a été suivi d'un été plus chaud et plus sec que les normales saisonnières. Une plus forte pluviométrie et une baisse des températures sont relevées à partir de septembre 2024 (Figure 8). Concernant la direction des vents, les vents majoritaires provenaient du nord (Mistral) et dans une moindre mesure du sud.

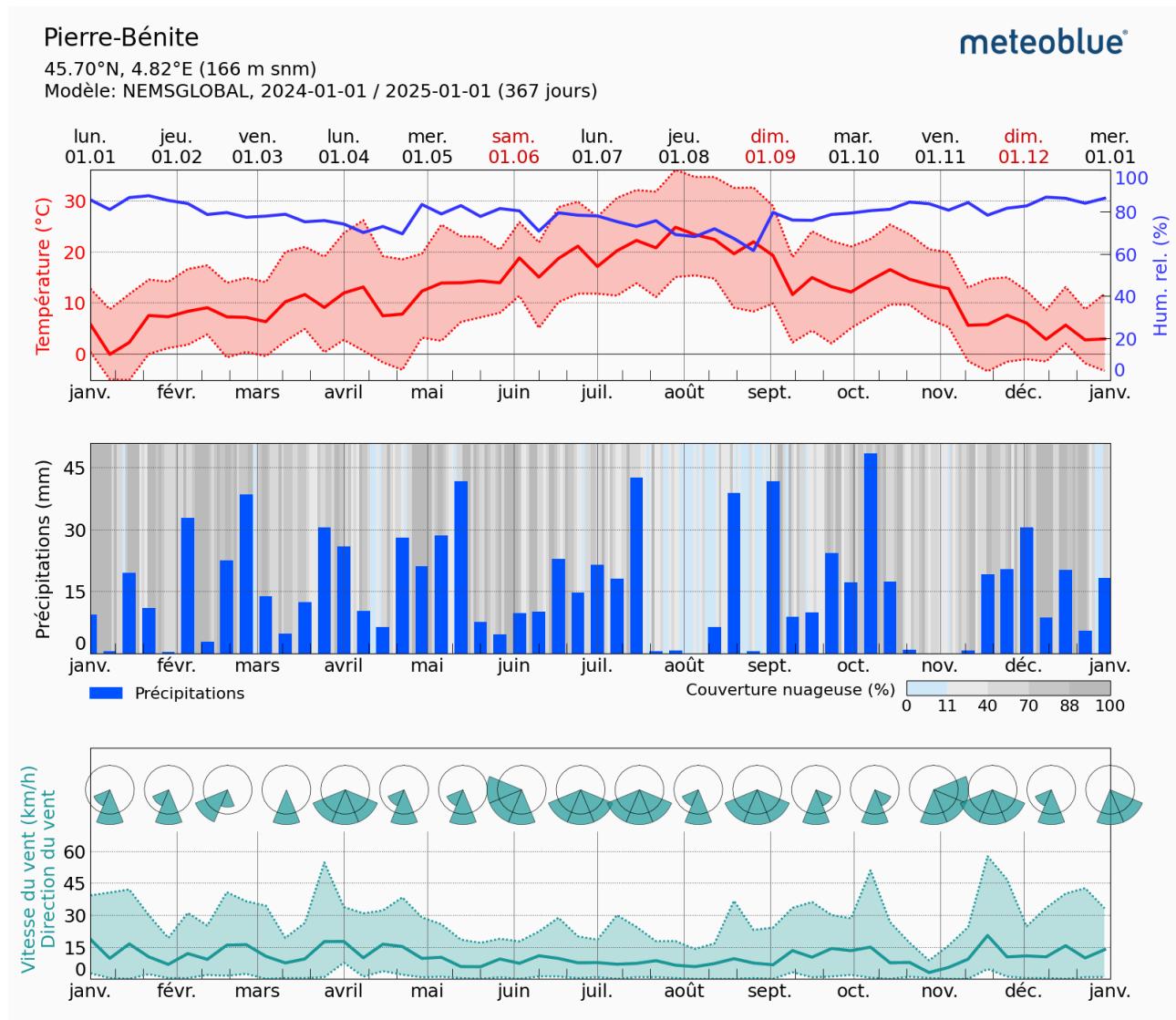


Figure 8 : Condition météorologique en 2024, année de prélèvements des lichens dans le sud lyonnais (Meteoblue – Station Lyon - Saint-Priest)

3.3 Prélèvements et pré-traitements des échantillons

Les placettes d'étude ont une surface de 200 m² environ, parfois jusqu'à 500 m² lorsque les lichens sont peu abondants. Pour chacun des sites, des thalles du lichen *Xanthoria parietina* ont été prélevés les 24 et 25 septembre 2024 sur des troncs d'arbres à au moins 1 m de hauteur pour s'affranchir de l'influence des poussières de sol, pouvant interférer sur la composition de l'échantillon. La totalité du thalle lichénique a été prélevée du fait de l'incapacité à dater tout ou partie du thalle, le taux de croissance étant très variable même au sein d'une même espèce (Amstrong & Bradwell, 2011). Les prélèvements d'échantillons ont été réalisés sur différentes espèces d'arbres phorophytes (principalement des peupliers, des frênes, des tilleuls et des robiniers pseudo-acacia), ce choix permettant d'augmenter la représentativité naturelle du milieu en s'affranchissant de la possible dépendance due à l'espèce considérée. Aussi, l'ensemble des orientations du tronc a été prélevé afin que l'échantillonnage soit représentatif de la qualité de l'air globale sur le site.

Les lichens ont été prélevés avec des gants de protection et un couteau en céramique (non métallique) pour éviter toute contamination externe. Le couteau a été lavé à l'eau ultra-pure après chaque utilisation. Les échantillons de 10 à 15 g ainsi obtenus ont ensuite été placés en glacière réfrigérée (environ 4 °C) et amenés jusqu'au laboratoire de préparation de l'IECP dans des flacons en HDPE préalablement étiquetés, où ils ont été immédiatement conservés à 4 °C en attendant leur préparation.

Au laboratoire, les échantillons de lichens ont été triés dans les 3 jours après leur prélèvement, avec du matériel non métallique préalablement lavé à l'eau ultra-pure (pince en plastique et couteau en céramique), en retirant délicatement les poussières, les débris de végétaux, les espèces non souhaitées et les écorces. Environ 10 g d'échantillon humide de chaque site ont été ainsi triés, puis congelés à -42 °C pendant au moins 24 h. Ils ont ensuite été lyophilisés (-55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4 LD) pendant 72 h. Cette méthode a été préférée au séchage à l'étuve puisqu'elle permet de limiter la perte d'éléments volatils. Par la suite, leur broyage a été effectué via un broyeur à billes (capsules et billes en zirconium, Retsch MM 400) durant 90 secondes à une fréquence de 25 Hz, afin d'obtenir une poudre très fine et homogène, sans échauffement et sans contamination externe. Entre chaque échantillon, les capsules et billes ont été lavées dans un bain acide 7 %, rincées à l'eau ultra-pure, lavées à l'acétone puis à nouveau rincées à l'eau ultra-pure. Elles ont ensuite été séchées à l'étuve à 40 °C, et refroidies à température ambiante avant d'être réutilisées.

Après le broyage, la fine poudre a été récupérée dans des flacons NALGENE® préalablement étiquetés, puis stockés à -42 °C en attendant la réalisation des analyses chimiques.

Les échantillons sont analysés par des laboratoires partenaires de l'Institut, en fonction des éléments recherchés : PFAS et lévoglucosan (traceur de combustion de bois) par le LCE, Polychlorobiphényles (PCB, environ 30 congénères), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, liste USEPA) et 20 métaux et métalloïdes par le Laboratoire d'analyse chimique de la Timone, et dioxines et furanes (PCDD/F, liste OMS i.7 congénères) par le Laboratoire Terana Drôme.

3.4 Analyses des PFAS

Les lichens ont déjà été utilisés pour la surveillance des métaux, des PCB, des PCDD-F et des HAP (Guidotti et al., 2003 et 2009 ; Augusto et al., 2009 ; Loppi et al., 2015 ; Ratier et al., 2018 ; Van der Wat et Forbes, 2015 ; Dron et al., 2021 ; Ortega Fernández et al., 2022 ; Reuillard, 2023) et plus récemment des pesticides (Durand et al., 2024). L'étude des PFAS dans les lichens est assez rare. À notre connaissance, seuls deux articles ont étudié les PFAS dans les lichens (Antarctique et Canada) (Müller et al., 2011 ; Alava et al., 2015), se limitant aux environnements arctiques et ne se concentrant pas nécessairement sur la biosurveillance atmosphérique.

L'extraction des HAP, des PCB ou des pesticides a été réalisée au moyen de différentes techniques d'extraction, impliquant le Soxhlet (Augusto et al., 2010 ; Loppi et al., 2015 ; Van der Wat et Forbes, 2015 ; Ratier et al., 2018), l'ultrason (Guidotti et al., 2003, 2009 ; Van der Wat et Forbes, 2015 ; Ratier et al., 2018 ; Dron et al., 2021 ; Ortega Fernández et al., 2022), ASE (Reuillard, 2023), QuEChERS (Van der Wat et Forbes, 2015) et l'extraction assistée par micro-ondes (MAE) (Van der Wat et Forbes, 2015).

Pour les PFAS, un développement analytique a été réalisé par le LCE (Aix-Marseille Université) permettant de définir la méthode d'extraction et de purification et de sélectionner le solvant le plus adapté pour l'analyse de 48 PFAS (Annexe 1). La méthode d'extraction sélectionnée après plusieurs essais avec différents protocoles testés est l'utilisation de 3 cycles de 15 min d'ultrasons avec comme solvant d'extraction du méthanol avec 0,1 % d'hydroxyde d'ammonium (NH₄OH). Les lichens étant une matrice complexe, la purification de l'extrait avant injection est nécessaire pour limiter les effets de matrice. Elle a été réalisée à l'aide d'une cartouche ENVI-Carb™ (250 mg, 3mL Supelco). Enfin, les extraits purifiés ont été analysés par LC-MS/MS QqTRAP 7500 (Sciex) permettant la détection et la quantification de 48 molécules PFAS (Annexe 1) comprenant les 20

PFAS réglementés par l'UE (Annexe 2). Les résultats d'analyse du 6:2 FTS sont non exploitables en raison de problème de contamination.

3.5 Premiers résultats

Les résultats sont traités dans le but de cartographier les expositions moyennes et mieux comprendre les caractéristiques des sources d'émission auxquelles le territoire d'investigation est soumis. Le croisement des analyses de PFAS avec ces nombreux autres polluants permettra d'évaluer leur participation au cocktail d'exposition atmosphérique et d'affiner l'identification des sources des PFAS. La comparaison avec les sites de la zone d'utilisation (Fos-Berre) dans le cadre du projet MATISSE permettra de comparer les expositions et contaminations environnementales en termes de niveaux et surtout de profils de contaminants dans les lichens afin d'identifier et analyser les différences et les similitudes.

Les résultats sont toujours en cours d'acquisition. Dans le Tableau 5, sont présentées les teneurs en PFAS relevées sur 3 sites GAO, BRO et BEN, tous situés à Oullins-Pierre-Bénite. Ils sont comparés avec les niveaux moyens enregistrés sur 13 sites de la Métropole Aix-Marseille-Provence. Les valeurs inférieures à la limite de détection et de quantification ainsi que les valeurs non exploitables sont considérées égales à 0, seuls les PFAS quantifiés au moins sur un site sont présentés.

Sur les premiers résultats obtenus, des niveaux très élevés sont observés en aval du complexe industriel ARKEMA-DAICHIN à Oullins-Pierre-Bénite (BRO = 324,59 ng/g en PFAS totaux), représentant plus de 300 fois les niveaux enregistrés en amont (GAO = 1,01 ng/g en PFAS totaux). Une dilution des concentrations est observée avec la distance à la plateforme industrielle avec des concentrations significativement plus faibles sur le site BEN (16,25 ng/g en PFAS totaux) plus éloigné que BRO, tous les deux situés sous les vents dominants par rapport au site industriel. Dans le détail, deux composés sont largement majoritaires sur le site BRO, le PFUnDA et le PFTrDA. Peuvent aussi être cités, le PFHxA et dans une moindre mesure le PFNA qui présentent des niveaux significatifs sur BRO par rapport à GAO. Leur utilisation pendant de nombreuses années sur la plateforme ARKEMA-DAIKIN a pu entraîner une contamination de l'environnement aujourd'hui encore marquée d'un point de vue atmosphérique. Une signature comparable est observée sur le site BEN, en aval mais plus éloigné de la plateforme industrielle que BRO (890 contre 275 m), avec les mêmes composés majoritaires que sur BRO (PFTrDA, PFUnDA et dans une moindre mesure PFHxA et PFNA) relevés à des niveaux de 15 à 30 fois moins élevés. A noter que les congénères

majoritaires relevés sur le site BRO (PFTrDA, PFUnDA), correspondant au stade du Brotillon (site atelier), sont aussi les composés majoritaires relevés dans le sol semblant indiquer un impact des envols de poussières de sol contaminées sur la qualité de l'air.

Tableau 5 : Concentrations en ng/g MS des congénères PFAS dans les lichens sur 3 sites d'étude du sud lyonnais et comparaison avec les niveaux enregistrés sur la Métropole Aix-Marseille-Provence

(MAMP – 13 sites, min, max et moyenne)

	GAO	BRO	BEN	Moy MAMP (13)
PFBA	0,00	0,13	0,00	0,00-0,00 (0,00)
PFPeA	0,00	1,32	0,00	0,00-0,00 (0,00)
PFHxA	0,00	34,11	0,99	0,00-0,00 (0,00)
PFHpA	0,00	0,53	0,08	0,00-0,11 (0,01)
PFOA	0,05	1,03	0,27	0,00-0,47 (0,11)
PFNA	0,09	4,80	1,28	0,00-0,35 (0,11)
PFDA	0,08	1,33	0,46	0,05-0,49 (0,20)
PFUnDA	0,12	113,50	6,03	0,00-0,66 (0,15)
PFDoDA	0,07	2,71	0,60	0,05-0,60 (0,17)
PFTrDA	0,11	161,22	5,21	0,00-0,27 (0,08)
PFTeDA	0,05	1,51	0,42	0,02-0,14 (0,07)
PFHxDA	0,03	0,71	0,25	0,00-0,07 (0,02)
PFODA	0,01	0,14	0,02	0,00-0,01 (0,00)
PFHxS	0,00	0,00	0,00	0,00-0,44 (0,04)
PFOS	0,07	0,00	0,00	0,00-0,08 (0,01)
PFECHS	0,00	0,00	0,00	0,00-0,01 (0,00)
8:2 FTS	0,00	0,08	0,05	0,00-0,29 (0,07)
10:2 FTS	0,01	0,12	0,07	0,00-0,20 (0,06)
FOSA	0,01	0,02	0,03	0,01-0,02 (0,01)
FBSA	0,01	0,00	0,00	0,00-0,00 (0,00)
N-MeFOSAA	0,00	0,00	0,04	0,00-0,03 (0,00)
N-EtFOSAA	0,00	0,01	0,02	0,00-0,03 (0,01)
N-MeFBSAA	0,01	0,01	0,01	0,00-0,01 (0,00)
6:2diPAP	0,02	0,02	0,00	0,00-0,09 (0,01)
6:2/8:2diPAP	0,00	0,01	0,00	0,00-0,05 (0,00)
6:2FTAB	0,20	1,29	0,42	0,06-6,31 (0,42)
PFAS TOT	1,01	324,59	16,25	0,20-6,91 (1,98)

En comparant avec les niveaux enregistrés sur la MAMP, les concentrations totales en PFAS dans le secteur de Fos-Berre sont comparables aux niveaux enregistrés sur le site GAO. Les composés relevés à des niveaux élevés au sud de la plateforme industrielle à Oullins-Pierre-Bénite (BRO et BEN) (PFUnDA, PFTDA, PFHxA et PFNA) sont faiblement concentrés dans le bassin industriel méditerranéen. Le PFHxS, absent du sud lyonnais, est relevé sur plusieurs sites de la zone industrielle de Fos.

L'acquisition de l'ensemble des résultats PFAS dans les lichens complétée par les teneurs pour d'autres familles de contaminants (métaux, HAP, PCB, PCDD-F, levoglucosan) permettra de préciser les niveaux et sources d'exposition principales pour chaque territoire d'étude.

4 Conclusion et perspectives

Après avoir prospecté et identifié un site atelier à Oullins-Pierre-Bénite, définie comme zone de production des PFAS, les premières investigations de terrains ont eu lieu en septembre 2024 pour les prélèvements de lichens et en mars et avril 2025 pour le travail sur le site atelier.

Après la réalisation et la validation des développements analytiques menés au LCE, les analyses réalisées sur les différentes matrices permettront de déterminer l'occurrence des composés PFAS dans les différentes matrices selon les sources d'émission.

Les premiers résultats montrent cependant un fort impact de l'activité industrielle de la ville sur les niveaux de PFAS relevés dans l'air, les sols et la nappe souterraine. En effet, une contamination très élevée est observée dans la nappe souterraine en aval du site ARKEMA avec des concentrations près de 200 fois plus importantes que celles relevées en amont. De même, une exposition atmosphérique significative et largement supérieure aux niveaux enregistrés dans le reste du territoire est mesurée au niveau du stade du Brotillon, point de mesure le plus concentré de la vallée de la chimie et sous les vents dominants par rapport au site industriel. Enfin, les sols du stade du Brotillon présentent une pollution diffuse de surface élevée, potentiellement en lien avec l'exposition atmosphérique aux émissions industrielles depuis de nombreuses années, avec à priori un faible transfert dans le profil de sol pour les congénères PFAS à longue chaîne. Ces résultats montrent la persistance des PFAS dans l'environnement traduisant une pollution préoccupante, transférable et persistante à partir d'une source anthropique locale.

La poursuite des travaux dans le cadre du projet MATISSE apportera des précisions sur le comportement des PFAS dans l'environnement et plus particulièrement sur leur capacité de transferts entre matrice environnementale qui livrera des informations sur les sources d'exposition des populations en zone industrielle. Enfin, l'étude des effets d'exposition à des mélanges complexes contenant des PFAS permettra de faire un lien direct avec les impacts sanitaires de ces polluants éternels et les études de santé menées en parallèle dans la Métropole du Grand Lyon.

5 Bibliographie

AAP3TR MATISSE LCE 23-AMU-PMSE-02, n.d.

AFNOR NF X43904, 2013. Biosurveillance de l'air - Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide de lichens autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons. AFNOR, 17 p.

Agnan, Y., 2013. Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France: sources, mécanismes et facteurs d'influence. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse.

Alava, J.J., Gobas, F., Calle, K.P., Riofrío, M., Borbor-Cordova, M.J., Calle, N., Ikonomou, M.G., McDougall, M.R.R., Larramendy, M.L., Soloneski, S., 2015. Perfluorinated Chemicals in Sediments, Lichens, and Seabirds from the Antarctic Peninsula — Environmental Assessment and Management Perspectives. DOI: 10.5772/60205

ANSES, 2022. Rapport d'analyse sur les PFAS(sols et poussières) – Pierre-Bénite_v1.

Armstrong, R. A., & Bradwell, T. (2011). Growth of foliose lichens: a review. *Symbiosis*, 53, 1-16.

Augusto, S., Mágua, C., & Branquinho, C., 2009. Understanding the performance of different lichen species as biomonitoring of atmospheric dioxins and furans: potential for intercalibration. *Ecotoxicology*, 18, 1036-1042.

Austruy, A., Wanat, N., Moussard, C., Vernay, P., Joussein, E., Ledoigt, G., Hitmi, A., 2013. Physiological impacts of soil pollution and arsenic uptake in three plant species: Agrostis capillaris, Solanum nigrum and Vicia faba. *Ecotoxicol Environ Saf* 90:28-34.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.008>

Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., De Voogt, P., Astrup Jensen, A., Kannan, K., Mabury, S.A., Van Leeuwen, S.P.J., 2011. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances

in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integrated Environmental Assessment and Management — Volume 7, Number 4—pp. 513–541. DOI : 10.1002/ieam.258

Castell JF, 2009 : Biosurveillance de la qualité de l'air, AgroParisTech/INRA. [En ligne] : <http://biosurveillance-air.info>

Costello, M.C.S., Lee, L.S. 2024. Sources, Fate, and Plant Uptake in Agricultural Systems of Per- and Polyfluoroalkyl Substances. Curr Pollution Rep, 10, 799–819. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00168-y>

De Temmerman, L., Claeys, N., Roekens, E., Guns, M., 2007. Biomonitoring of airborne mercury with perennial ryegrass cultures. Environmental Pollution, 146(2), 458-462. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.07.002>.

Dron, J., Austruy, A., Agnan, Y., Ratier, A., Chamaret, P., 2016. Utilisation de la biosurveillance lichénique sur la zone industriello-portuaire de Fos-sur-Mer: retour sur trois ans de suivi à l'échelle d'un territoire intercommunal. Pollution atmosphérique, 228, 1.

Dron, J., Ratier, A., Austruy, A., Revenko, G., Chaspoul, F., Wafo, E., 2021. Effects of meteorological conditions and topography on the bioaccumulation of PAHs and metal elements by native lichen (*Xanthoria parietina*). Journal of environmental sciences, 109, 193-205.

Durand, A., Dron, J., Prudent, P., Wortham, H., Dalquier, C., Reuillard, M., Austruy, A, 2024. Evaluation of the atmospheric pollution by pesticides using lichens as biomonitor. Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177286>

ECHA. <https://echa.europa.eu/fr/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>. Consulté en octobre 2025.

Guidotti M, Stella D, Owczarek M, De Marco A, De Simone C., 2003. Lichens as polycyclic aromatic hydrocarbon bioaccumulators used in atmospheric pollution studies. J Chromatogr A., 985(1-2), 185-90. DOI: 10.1016/s0021-9673(02)01452-8

Guidotti M, Stella D, Dominici C, Blasi G, Owczarek M, Vitali M, Protano C., 2009. Monitoring of traffic-related pollution in a province of central Italy with transplanted lichen *Pseudovernia furfuracea*. Bull Environ Contam Toxicol. 83(6), 852-8. DOI: 10.1007/s00128-009-9792-7

Lasters, R., Groffen, T., Eens, M., Bervoets, L., 2024. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in homegrown crops: Accumulation and human risk assessment. Chemosphere, 364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143208>.

Lauverjat, N., 2022. PFAS dans l'environnement.

Loppi, S., Pozo, K., Estellano, V.H., Corsolini, S., Sardella, G., Paoli, L., 2015. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by lichen transplants: Comparison with gas-phase passive air samplers. Chemosphere, 134, 39-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.066>.

Nimis, P. L., Scheidegger, C., & Wolseley, P. A. (2002). Monitoring with lichens—monitoring lichens: an introduction. Springer Netherlands (pp. 1-4).

Ortega Fernández, L.M., Uribe Ante, D.M., Grassi, M.T., Dolatto, R.G., Sánchez, N.E., 2022. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons extracted from lichens by gas chromatography-mass spectrometry. MethodsX. 9, 101836. DOI : 10.1016/j.mex.2022.101836

Muller, C.E., De Silva, A.O., Small, J., Williamson, M., Wang, X., Morris, A., Katz, S., Gamberg, M., Muir, D.C.G., 2011. Biomagnification of Perfluorinated Compounds in a Remote Terrestrial Food Chain: Lichen-Caribou-Wolf. Environ Sci Technol, 45(20), 8665-73. DOI : 10.1021/es201353v. Epub 2011 Sep 9.

RAMBOLL, 2023. Etude historique PFAS – Arkema.

Ratier, A., Dron, J., Revenko, G., Austruy, A., Dauphin, C. E., Chaspoul, F., & Wafo, E. (2018). Characterization of atmospheric emission sources in lichen from metal and organic contaminant patterns. Environmental Science and Pollution Research, 25, 8364-8376.

Reuillard, M. (2023). Biosurveillance atmosphérique de la Métropole Aix-Marseille-Provence : Campagne lichens 2021. Rapport d'étude, Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions.

Salvatore, D., Mok, K., Kimberly K.G., Poudrier, G., Brown, P., Birnbaum, L.S., Goldenman, G., Miller, M.F., Patton, S., Poehlein, M., Varshavsky, J., Cordner, A., 2022. Presumptive Contamination: A New Approach to PFAS Contamination Based on Likely Sources. *Environmental Science & Technology Letters*, 9(11). DOI : 10.1021/acs.estlett.2c00502.

Teymoorian, T., Delon, L., Munoz, G., Sauvé, S., 2025. Target and Suspect Screening Reveal PFAS Exceeding European Union Guideline in Various Water Sources South of Lyon, France. *Environmental Science & Technology Letters*, 12(3), 327-333. DOI : 10.1021/acs.estlett.4c01126

Van der Wat, L., Forbes, P.B.C., 2015. Lichens as biomonitor for organic air pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 64, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.09.006>.

Van Haluwyn, C., Garrec, J.P., Asta, B., Bispo, A., et al., 2008. Norme NF X 43-901 - Biosurveillance de la qualité de l'air à l'aide de ray-grass : des cultures à la préparation des échantillons. AFNOR - Association Française de Normalisation, 13 p., 2008, Catalogue AFNOR. (hal-02824852).

Van Halluwyn, C., Cuny, D., Garrec, J.P., 2011. Introduction générale -Définitions, concepts et enjeux généraux de la biosurveillance de la qualité de l'air. *Pollution Atmosphérique*, 3, 7.

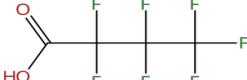
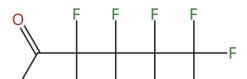
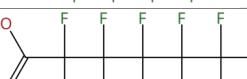
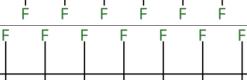
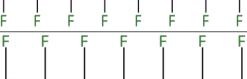
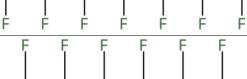
Wang, Y., Munir, U., Huang, Q., 2023. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in soil: Sources, fate, and remediation. *Soil & Environmental Health*, 1(1). <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100004>.

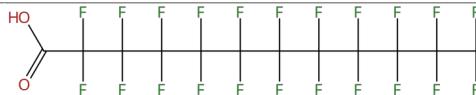
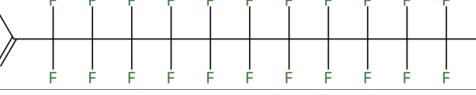
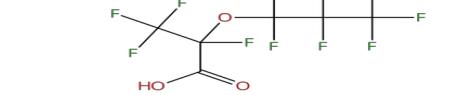
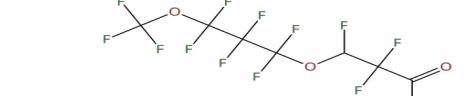
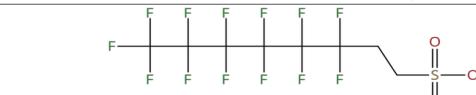
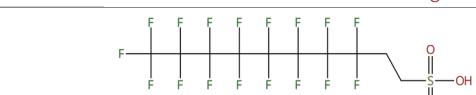
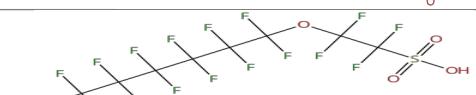
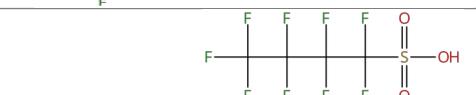
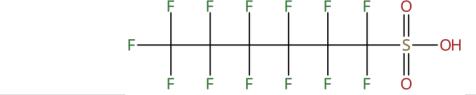
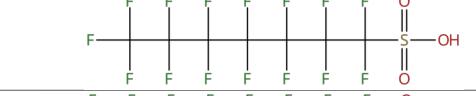
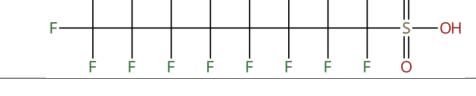
Xie, H., Ma, Y., Wang, Y., Sun, F., Liu, R., Liu, X., Xu, Y., 2021. Biological response and phytoremediation of perennial ryegrass to halogenated flame retardants and Cd in contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106526>.

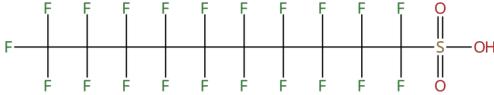
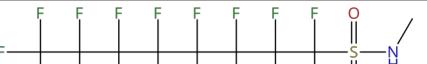
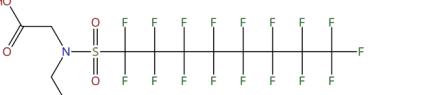
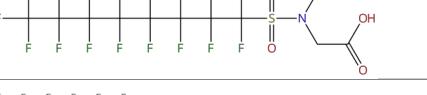
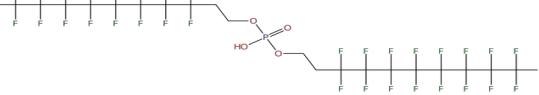
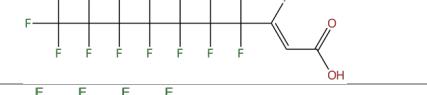
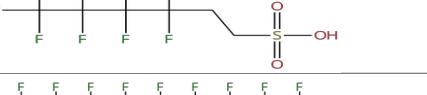
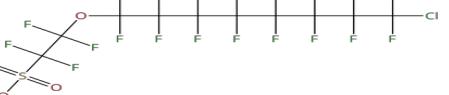
6 Liste des Annexes

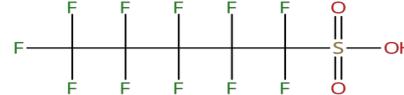
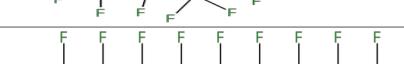
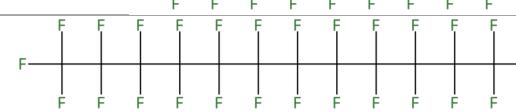
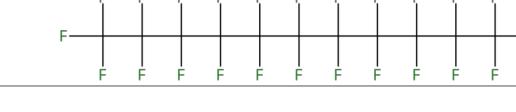
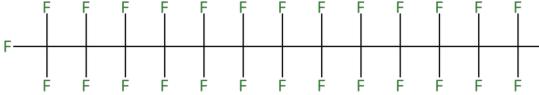
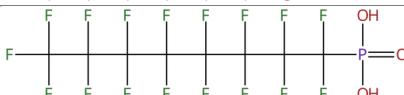
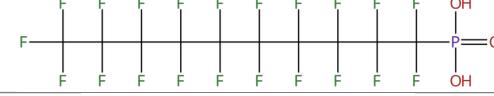
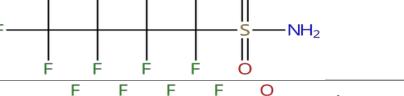
Annexe 1 : Liste des PFAS analysés.....	28
Annexe 2 : Liste des 20 PFAS contrôlés par l'UE.....	33
Annexe 3 : Description des profils de sol relevés dans chaque carottage.....	34
Annexe 4 : Liste des PFAS par famille.....	36

Annexe 1 : Liste des PFAS analysés

Noms	Acronyme	Formule	Structure	Masse molaire	Cas
Perfluoro-n-butanoic acid	PFBA	C3F7COOH		213,99	375-22-4
Perfluoro-n-pentanoic acid	PFPeA	C4F9COOH		262,98	2706-90-3
Perfluorohexanoic acid	PFHxA	C5F11COOH		312,97	307-24-4
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	C6F13COOH		362,97	375-85-9
Perfluoroctanoic acid	PFOA	C7F15COOH		412,97	335-67-1
Perfluorononanoic acid	PFNA	C8F17COOH		462,96	375-95-1
Perfluorodecanoic acid	PFDA	C9F19COOH		512,96	335-76-2
Perfluoroundecanoic acid	PFUnDA	C10F21COOH		562,96	2058-94-8
Perfluorododecanoic acid	PFDoA	C11F23COOH		612,95	307-55-1
Perfluorotridecanoic acid	PTfDA	C12F25COOH		662,95	72629-94-8

Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	C13F27COOH		712,95	376-06-7
Perfluorohexadecanoic acid	PFHxDA	C15F31COOH		812,94	67905-19-5
Perfluoro(2-methyl-3-oxahexanoic) acid	HFPO-DA	C6HF11O3		330,05	13252-13-6
4,8-dioxa-3H-perfluorononanoic acid	DONA	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₄		376,97	919005-14-4
1H,1H,2H,2H-Perfluorooctane sulfonic acid	6:2 FTS	C8F13H4SO ₃		425,96	27619-97-2
1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorodecane sulfonic acid	8:2 FTS	C10F17H5SO ₃		526,96	39108-34-4
9-chlorohexadecafluoro-3-oxanonane-1-sulfonic acid	9Cl-PF3ONS	C ₈ HCIF ₁₆ O ₄ S		532,58	756426-58-1
Perfluorobutane(-1-)sulfonic acid	PFBS	C4F ₉ SO ₂ OH		298,94	375-73-5
Perfluorohexanesulfonic acid (potassium salt)	PFHxS linéaire	C6F ₁₃ SO ₂ OH		398,94	355-46-4
Perfluoro-1-heptanesulfonic acid	PFHpS	C7F ₁₅ SO ₂ OH		448,93	375-92-8
Perfluoro-1-octanesulfonic acid	PFOS linéaire	C8F ₁₇ SO ₂ OH		498,93	1763-23-1

Perfluoro-1-decanesulfonic acid	PFDS	C10F21SO2OH		598,92	335-77-3
Perfluorooctane sulfonamide	PFOSA	C8F17SO2NH2		497,95	754-91-6
Sulfuramid (N-ethyl perfluorooctane sulfonamide)	NEtFOSA	C10F17H6NO2S		525,98	4151-50-2
N-methyl perfluorooctane sulfonamide	NMeFOSA	C9F17H4NO2S		511,96	31506-32-8
N-ethyl perfluorooctane sulfonamido acetic acid	NetFOSAA linéaire	C12F17H8NO4S		583,98	2991-50-6
N-methyl perfluorooctane sulfonamido acetic acid	NMeFOSAA	C11F17H6NO4S		569,97	2355-31-9
Bis[2-(perfluorooctyl)ethyl] phosphate	8:2 DiPAP	C20F34H9O4P		988,96	678-41-1
2H-perfluoro-2-decanoic acid	8:2FTUCA	C10 H2 F16 O2		458,10	70887-84-2
1H,1H,2H,2H-Perfluorohexane sulfonic acid	4:2 FTS	C6H5F9O3S		328,15	757124-72-4
1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorododecane sulfonic acid	10:2 FTS	C12 H5 F21 O3 S		628,20	120226-60-0
11-chloroeicosafuoro-3-oxaundecane-1-sulfonic acid	PF3OUdS	11Cl-C10HClF20O4S		632,60	763051-92-9

Perfluoro-1-pentanesulfonic acid	PFPeS	$C_5F_{11}SO_3H$		350,11	2706-91-4
Perfluoro-4-ethylcyclohexanesulfonic acid	PFECHS	$C_8HF_{15}O_3S$		462,13	646-83-3
Perfluoro-1-nonanesulfonic acid	PFNS	$C_9F_{19}SO_3H$		550,14	68259-12-1
Perfluorododecanesulfonic acid	PFDoDS	$C_{12}HF_{25}O_3S$		700,16	79780-39-5
Perfluroundecanesulfonic acid	PFUnDS	$C_{11}F_{23}SO_3H$		650,15	749786-16-1
Perfluorotridecanesulfonic acid	PFTrDS	$C_{13}HF_{27}O_3S$		750,17	791563-89-8
Perfluoro-n-hexane sulfonamide	PFHxSA	$C_6F_{13}SO_2NH_2$		399,13	41997-13-1
Acide perfluoroctylphosphonique	PFOPA	$C_8H_2F_{17}O_3P$		500,05	40143-78-0
Acide perfluorodecylphosphonique	PFDPA	$C_{10}H_2F_{21}O_3P$		600,06	52299-26-0
Perfluoro-n-butanesulfonamide	PFBSA	$^{13}C_4^{12}C_{16}H_8F_{34}O_4P$		299,12	30334-69-1
N-methylperfluor-n-butanesulfonamide	MePFBSA	$C_5H_4F_9NO_2S$		313,14	68298-12-4

N-methylperfluoro-n butanesulfonylamide acetic acid	MePFBSAA	C ₇ H ₆ F ₉ NO ₄ S		371,18	159381-10-9
Perfluorooctadecanoic acid	PFODA	C ₁₇ F ₃₅ COOH		914,15	16517-11-6
6:2 fluorotelomer phosphate	6:2 diPAP	C ₁₆ H ₉ F ₂₆ O ₄ P		790.17	57677-95-9
6:2/8:2 fluorotélomère Phosphate diester	6:2/8:2 diPAP	C ₁₈ H ₉ F ₃₀ O ₄ P		890.17	57677-95-9

Annexe 2 : Liste des 20 PFAS réglementés par l'UE

- ➔ Acide perfluorobutanoïque (PFBA)
- ➔ Acide perfluoropentanoïque (PFPeA)
- ➔ Acide perfluorohexanoïque (PFHxA)
- ➔ Acide perfluoroheptanoïque (PFHpA)
- ➔ Acide perfluorooctanoïque (PFOA) - également interdit par la Convention de Stockholm
- ➔ Acide perfluorononanoïque (PFNA)
- ➔ Acide perfluorodecanoïque (PFDA)
- ➔ Acide perfluoroundécanoïque (PFUnA)
- ➔ Acide perfluorododécanoïque (PFDoA)
- ➔ Acide perfluorotridécanoïque (PFTrDA)
- ➔ Acide perfluorobutane sulfonique (PFBS)
- ➔ Acide perfluoropentane sulfonique (PFPeS)
- ➔ Acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS) - également interdit par la Convention de Stockholm
- ➔ Acide perfluoroheptane sulfonique (PFHpS)
- ➔ Acide perfluorooctane sulfonique (PFOS) - également interdit par la convention de Stockholm
- ➔ Acide perfluoronone sulfonique (PFNS)
- ➔ Acide perfluorodécane sulfonique (PFDS)
- ➔ Acide perfluoroundécane sulfonique (PFUnDS)
- ➔ Acide perfluorododécane sulfonique (PFDoDS)
- ➔ Acide perfluorotridécane sulfonique (PFTrDS)

Annexe 3 : Description des profils de sol relevés dans chaque carottage

Sondage zone A

Cinq horizons ont été décrits dont quatre ont été analysés en PFAS

- H1 (0-15 cm) : horizon de surface, humide, riche en matière organique. Limoneux argileux, structure grumeleuse à subanguleuse, couleur brun foncé. Présence de nombreuses racines (3, ø <1 cm) et vers de terre et de quelques briques et quelques déchets. La porosité est importante. Transition nette. *Echantillonné et analysé*
- H2 (15-20 cm) : horizon de couleur noire, probable ancien enrobé enfui. Particules de taille sable. Transition nette. *Echantillonné mais non analysé*
- H3 (20-120 cm) : Horizon de remblais sablo-graveleux hétérogène. Pas de structure. Présence d'éléments grossiers type brique. Couleur claire jaunâtre à blanchâtre. Transition nette. *Echantillonné et analysé*
- H4 (120-300 cm) : Horizon de remblais sablo-limoneux, plus homogène que l'horizon précédent. Couleur ocre, plus humide que H3. Pas de structure. Quelques éléments grossiers et déchets, présence de béton et matériaux de construction. Transition nette. *Echantillonné et analysé*
- H5 (300-480 cm) : Horizon argilo-sableux, brun ocre, très humide. Structure subanguleuse à anguleuse. Quelques traces d'hydromorphie de fer oxydé et réduit. *Echantillonné et analysé*

Sondage zone B

Quatre horizons ont été décrits et analysés en PFAS

- H1 (0-25 cm) : horizon de surface, humide, riche en matière organique et limons. Structure grumeleuse, couleur brun foncé. Présence de nombreuses racines (3, ø < 0,5 cm) et vers de terre et de quelques charbons. La porosité est importante. Transition nette. *Echantillonné et analysé*
- H2 (25-260 cm) : horizon hétérogène composé de remblais sablo-limoneux brun, légèrement humide. Pas de structure. Présence de morceaux de béton et de charbon, nombreux éléments grossiers et quelques déchets (plastiques, verres, ...) et mâchefers (environ 25 %). Quelques racines jusqu'à 1 m (1). Transition diffuse de 5 cm. *Echantillonné et analysé*
- H3 (260-320 cm) : Horizon plus homogène de remblais argilo-limoneux, très humide. Structure sub-anguleuse. Couleur brun clair, argile brune. Présence de brique, béton et autres matériaux hétérogènes et de quelques charbons. Traces d'hydromorphie. *Echantillonné et analysé*
- H4 (320-480 cm) : Horizon argileux brun clair, très humide. Structure subanguleuse. Quelques concrétions sableuses, quelques traces d'hydromorphie de fer oxydé à partir de 4 m. *Echantillonné et analysé*

Annexe 4 : Liste des PFAS par famille

Famille	Nombre	Acronyme
PFCAs	13	PFPeA ; PFBA ; PFHxA ; PFHpA ; PFOA PFNA ; PFDA ; PFUnDA ; PFDoDA PFTrDA ; PFTeDA ; PFHxDA ; PFODA
PFSAs	11	PFBS ; PFPeS ; PFHxS ; PFHpS ; PFNS ; PFOS ; PFDS ; PFUnDS ; PFDoDS ; PFTrDS ; PFECHS
PFESA	2	9Cl-PF3ONS ; 11Cl-PF3OUnDS
PFECA	2	HFPO-DA ; DONA
FASA	6	FOSA ; N-MeFOSA ; N-EtFOSA ; FBSA ; NMeFBSA ; PFHxSA
FASAA	4	N-MeFOSAA ; N-EtFOSAA ; N-MeFBSAA, FOSAA
DiPAP	3	6:2diPAP ; 8:2 diPAP ; 6:2/8:2diPAP
FTS	4	4:2 FTS ; 6:2 FTS ; 8:2 FTS ; 10:2 FTS
Autres	2	6:2 FTAB ; 8:2 FTUCA