



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

État des lieux des pratiques d'échantillonnage des PFAS en contexte de sites et sols pollués

Rapport final

BRGM/RP-75157-FR

Version 1 du 28 janvier 2026

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

BRGM

Ce rapport a été vérifié le 11/02/2026 et approuvé le 24/02/2026 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.

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 [Questionnaire d'évaluation de satisfaction BRGM \(2026\) – Remplir le formulaire](#) ou par ce code :



Mots clés : Échantillonnage ; PFAS ; pollution ; sols ; états des lieux

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

BRGM 2026. État des lieux des pratiques d'échantillonnage des PFAS en contexte de sites et sols pollués. Rapport final V1. BRGM/RP-75157-FR. 40 p., 2 fig., 6 tab.

© BRGM, 2026, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Contexte et objectifs

Ce rapport est issu des travaux d'un groupe de travail (GT) réunissant le BRGM et l'UPDS dédié aux protocoles d'échantillonnage des substances poly- et perfluorées (PFAS) dans les sols et les eaux souterraines.

Cette action est financée dans le cadre d'une subvention annuelle de la DGPR, perçue par le BRGM pour ses missions d'appui aux politiques publiques, notamment dans le cadre du Plan d'Action Interministériel sur les PFAS, lancé en avril 2024. Ce plan, copiloté par la DGS et la DGPR, visant à réduire les risques liés aux PFAS, comprend une cinquantaine d'actions réparties sous 5 axes :

- axe 1 améliorer les connaissances sur les méthodes d'analyses,
- axe 2 renforcer la surveillance des milieux,
- axe 3 : réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS,
- axe 4 : promouvoir l'innovation et soutenir la recherche,
- axe 5 : informer le public sur les PFAS.

Le BRGM est impliqué dans 14 actions, dont l'action 7 de l'Axe 2, qui vise à identifier et prioriser les sites potentiellement pollués par l'utilisation de mousses anti-incendie (aéroports, sites militaires, SDIS, *etc.*) et qui devront faire l'objet d'un diagnostic.

Ce GT contribue notamment à cette action 7, en précisant les modalités de réalisation de prélèvements de sols et d'eaux souterraines dans le cadre de diagnostics environnementaux.

Ce GT a pour mission principale de produire une synthèse des pratiques actuelles d'échantillonnage des PFAS, d'identifier les besoins méthodologiques et de formuler des recommandations techniques. Il doit notamment guider les réflexions futures sur les méthodologies à mettre en œuvre pour l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines en vue de l'analyse des PFAS lors des investigations environnementales des sites potentiellement pollués par l'utilisation de mousses anti-incendie.

Ce rapport fait la synthèse à date des travaux produits durant ce GT, à savoir :

- l'état des lieux des pratiques actuelles d'échantillonnage des acteurs sur le terrain,
- l'identification de lacunes méthodologiques (ex. : absence de normes, de pratiques harmonisées) et les besoins complémentaires (essais d'intercomparaison de méthodes, développement normatif, *etc.*),
- l'identification des bonnes pratiques à mettre en œuvre en fonction des connaissances actuellement disponibles.

Les travaux du GT sont toujours en cours ; les conclusions de ce rapport sont donc basées sur les connaissances actuelles. Les travaux prévus dans la suite de cette action devront aboutir à la consolidation des recommandations relatives aux pratiques d'échantillonnage.

Sommaire

1. Introduction	7
2. État des lieux des stratégies et techniques d'échantillonnage.....	9
2.1. ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX SOUTERRAINES	9
2.1.1. Positionnement des points d'échantillonnage	9
2.1.2. Type et profondeur de prélèvement.....	9
2.2. ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS.....	11
2.2.1. Positionnement des points d'échantillonnage	11
2.2.2. Types et profondeur de prélèvement	12
3. État des lieux des recommandations appliquées à l'échantillonnage.....	17
3.1. RISQUE DE CONTAMINATION DE L'ÉCHANTILLON PAR LE MATÉRIEL UTILISÉ POUR L'ÉCHANTILLONNAGE.....	17
3.1.1. Matériel de terrain utilisé pour le prélèvement	18
3.1.2. Flaconnage	23
3.2. RISQUES DE CONTAMINATION CROISÉE (INTER-ÉCHANTILLONS).....	26
3.2.1. Personnel en charge du prélèvement.....	26
3.3. TRANSPORT ET CONSERVATION.....	27
3.3.1. Personnel en charge du prélèvement.....	27
3.3.2. Laboratoires	28
3.4. AUTRES RECOMMANDATIONS	29
3.4.1. Communication avec le laboratoire d'analyse	29
3.4.2. Réalisation de duplicatas d'échantillonnage	29
4. Conclusions.....	31
5. Références.....	35

Liste des figures

- Figure 1 : Exemple de profils verticaux des teneurs en PFAS, mesurées en µg/kg, dans plusieurs piézomètres d'un site pollué par les PFAS en raison de l'utilisation de mousse anti-incendie (modifié d'après Bekele *et al.*, 2020)..... 11
- Figure 2 : Exemple d'évolution des teneurs en 3 PFAS dans les sols d'un site impacté par l'utilisation de mousse anti-incendie (d'après Bigler *et al.*, 2024)..... 14

Liste des Tableaux

- Tableau 1 : Stratégies d'échantillonnage habituellement utilisées sur les sites pollués par les PFAS en France et à l'étranger. 12
- Tableau 2 : Types d'échantillons de sol habituellement prélevés sur site en vue de la recherche de PFAS..... 13
- Tableau 3 : État des lieux des recommandations existantes pour l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines. nm : non mesuré..... 21
- Tableau 4 : État des lieux des recommandations existantes sur l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines dans la littérature. nm : non mesuré..... 25
- Tableau 5 : État des lieux des recommandations issues de la portant sur les pratiques de nettoyage du matériel de terrain servant à l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines pour le diagnostic des sites pollués par les PFAS.Laboratoires. 27
- Tableau 6 : État des lieux des recommandations concernant le transport et la conservation des échantillons d'eau et de sol..... 28

1. Introduction

Les études actuellement menées en France et à l'étranger pour le diagnostic de sites pollués montrent que la stratégie et les techniques d'échantillonnage des sols visant à caractériser la présence de PFAS reposent sur les méthodologies nationales de gestion des sites et des sols pollués en vigueur dans chaque pays (BRGM RP-73924-FR, 2025 ; BRGM RP-73455-FR, 2024). En France, les pratiques existantes en matière d'échantillonnage pour caractériser les pollutions aux PFAS reposent notamment sur :

- la [norme NF X31-620](#) sur les prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 2 : exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle ;
- la [norme NF ISO 18400-102](#) donnant les lignes directrices pour le choix et l'application des techniques d'échantillonnage ;
- le guide BRGM RP-70901-FR sur l'échantillonnage des sols pour la recherche de composés organiques volatils et semi-volatils ;
- le [guide MTE d'avril 2023](#) sur le diagnostic des sites et sols pollués ;
- la [Norme AFNOR NF X31-615 \(2026\)](#) sur le prélèvement et l'échantillonnage des eaux souterraines dans des forages de surveillance dans le cadre des sites pollués ou potentiellement pollués ;
- la [Norme AFNOR NF EN 17892](#) relative à la détermination de substances per- et polyfluoroalkylées sélectionnées dans l'eau potable.

À l'étranger, les directives et procédures type, telles que les normes ASTM International [D 4823-95](#) et [D 4448-01](#), ou encore [l'USEPA SESDPROC-513-R2](#), restent à la base des protocoles d'échantillonnage des PFAS appliqués sur site. En raison de l'utilisation ubiquiste des PFAS dans les matériaux courants utilisés sur le terrain, les blancs de terrain et d'équipement sont souvent nécessaires en plus grande quantité et plus fréquemment que pour l'analyse d'autres polluants organiques. Des recommandations supplémentaires sont souvent formulées pour éviter tout risque de contamination des échantillons.

La stratégie d'échantillonnage ainsi que les méthodes de prélèvement visent à s'adapter au mieux au comportement attendu des PFAS dans les sols, lequel demeure parfois mal compris. L'interprétation des résultats s'en trouve donc parfois complexifiée. Le présent rapport fait un état des lieux des principales techniques d'échantillonnage des eaux et des sols actuellement appliquées en France et à l'étranger, selon les contextes et les objectifs de l'étude, ainsi que les recommandations associées. Cet état des lieux repose sur :

- l'ensemble des données disponibles concernant l'échantillonnage des matrices d'eau souterraine et des sols, en vue de réaliser des diagnostics des sites pollués par les PFAS, issues de la littérature scientifique internationale au moment de la rédaction de ce rapport ;
- des échanges menés lors du groupe de travail avec les bureaux d'études de l'UPDS chargés des prélèvements et les laboratoires d'analyse.

2. État des lieux des stratégies et techniques d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage détermine la distribution spatiale des prélèvements afin de s'adapter au mieux aux objectifs de l'étude et de garantir la représentativité des données produites (ex. : délimiter les contours d'une pollution, estimer les risques sanitaires, etc.). Ainsi, de nombreuses stratégies d'échantillonnage sont mises en œuvre sur les sites pollués par les PFAS lors des diagnostics. Cette stratégie dépend non seulement des objectifs de l'étude, mais également du degré de connaissance de la qualité des milieux, ainsi que des caractéristiques et des aménagements du site (approche spécifique au site).

2.1. ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX SOUTERRAINES

2.1.1. Positionnement des points d'échantillonnage

Conformément à la méthodologie appliquée en France (MTE, 2023), les études disponibles sur site montrent que les prélèvements d'eau souterraine sont généralement effectués dans les piézomètres positionnés à minima en amont du site ou de la zone source potentielle (zones de référence non impactées), et dans plusieurs piézomètres positionnés en aval hydraulique (sur ou en dehors du site), afin de caractériser et de suivre la dispersion des PFAS le long des gradients hydrauliques préalablement déterminés (BRGM, 2025; Liu *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2025). Par exemple, les piézomètres en aval hydraulique des zones proches des anciens dépôts de mousses anti-incendie, des bassins industriels et des zones d'entraînement sont particulièrement ciblés lors du diagnostic des sites d'utilisation de mousses anti-incendie pour caractériser l'état des milieux (Adamson *et al.*, 2022; AVINOR, 2012; Høisæter *et al.*, 2019; Kulkarni *et al.*, 2025; SFT, 2008). Cependant, lorsque l'objectif de l'étude est **d'évaluer les risques sanitaires** (dans le cadre d'une approche d'Interprétation de l'État des Milieux (IEM), par exemple), l'échantillonnage consiste principalement à prélever dans les piézomètres en aval hydraulique de la source connue d'émission en PFAS localisée en amont ou à proximité des captages AEP ou des puits privés recensés eux même échantillonnés (ex. Bräunig *et al.*, 2017 ; Filipovic *et al.*, 2015 ; Xu *et al.*, 2025).

2.1.2. Type et profondeur de prélèvement

Dans les références bibliographiques disponibles à ce jour, les eaux souterraines sont prélevées par pompage classique, ou à l'aide d'un échantillonneur à immersion (ex : bailers, échantillonneurs passifs variés), ou de préleveurs multiniveaux dans les piézomètres existants ou lors de forages direct push (DPT) :

- uniquement en surface de la nappe, lorsqu'il s'agit uniquement de caractériser la présence ou l'absence de PFAS (ex. : Anderson *et al.*, 2016 ; Reinikainen *et al.*, 2022) (**cas rares, à réserver aux phases de pré-screening**) ;
- à différentes profondeurs lorsqu'il s'agit d'étudier le **transfert vertical des PFAS dans la nappe et de caractériser l'étendue du panache** (ex. : Adamson *et al.*, 2022 ; Houtz *et al.*, 2013 ; Tokranov *et al.*, 2021) ;
- sans aucune discrimination de niveau. C'est le cas le plus fréquent (ex. Filipovic *et al.*, 2015 ; Liu *et al.*, 2021). Le prélèvement est réalisé après la purge de l'ouvrage dans l'intervalle crépiné des ouvrages disponibles sur site. La profondeur n'est pas mentionnée. À noter que

des études récentes utilisent des échantillonneurs passifs dédiés aux PFAS, offrant la possibilité d'obtenir des mesures intégratives dans le temps des teneurs en PFAS dissoutes dans la nappe à une profondeur donnée (Dunn *et al.*, 2025 ; Kaltenberg *et al.*, 2023 ; McDermott *et al.*, 2022). Ces échantillonneurs passifs ne permettent cependant pas de purger l'ouvrage avant le prélèvement. Comme rappelé dans la norme NF X31-615, mise à jour en 2026, la purge permet d'obtenir un échantillon représentatif de la qualité de la nappe, et non des eaux résiduelles stagnantes présentes dans le tube du piézomètre. À noter que son application n'est cependant pas obligatoire et peut être évitée dans le cas d'ouvrages peu productifs ou, au contraire, dans celui d'ouvrages très productifs, où le débit de la nappe est suffisant pour assurer un renouvellement naturel de l'eau du forage.

Les résultats des campagnes menées à travers le monde montrent que certains PFAS présentent une mobilité élevée dans les eaux souterraines (ex. : PFAS à chaînes courtes et ultra-courtes), et que leur comportement dépend des conditions hydrogéologiques (variations du niveau de nappe, profondeur de la nappe phréatique, perméabilité du sol, conditions hydriques, *etc.*, BRGM, 2020 ; INERIS, 2024). Pour **caractériser correctement l'étendue d'une pollution par les PFAS dans les eaux souterraines lors d'un diagnostic**, il semble donc crucial (dans la mesure du possible) de réaliser des prélèvements à différentes profondeurs, car les résultats des travaux menés jusqu'à aujourd'hui montrent que les concentrations en PFAS peuvent varier selon la profondeur de prélèvement et la longueur de la chaîne des molécules ciblées (Figure 1, Bekele *et al.*, 2020 ; Tokranov *et al.*, 2021 ; Zeng *et al.*, 2024). À noter que la nécessité de prélever les eaux souterraines à différentes profondeurs n'est pas propre aux PFAS. Cette contrainte peut également s'appliquer à d'autres types de pollution courante, comme les pollutions par les hydrocarbures, dont la répartition verticale est influencée par la densité et la solubilité des composés ciblés. Ces substances, souvent moins ou plus denses que l'eau, peuvent en effet s'accumuler au niveau du toit ou du mur de la nappe, créant des gradients de concentration verticaux et rendant un prélèvement unique souvent peu représentatif. Un échantillonnage multiniveau est donc souvent requis pour une caractérisation précise de l'étendue de la pollution, tout comme pour les PFAS ou d'autres polluants présentant des comportements hétérogènes en profondeur.

D'autre part, plusieurs travaux ont montré que **les PFAS ont tendance à s'accumuler à l'interface air/eau**, en raison de leurs propriétés tensioactives (tête hydrophile et queue hydrophobe). Ainsi, quelle que soit leur solubilité, les PFAS peuvent s'accumuler préférentiellement à cette interface, au toit de la nappe phréatique (Brusseau et Guo, 2020 ; Guo *et al.*, 2020 ; Zeng *et al.*, 2024). Les fluctuations du niveau de la nappe peuvent ainsi favoriser le relargage continu de PFAS depuis la zone non saturée vers la nappe, créant des sources secondaires de pollution persistante. En conséquence, un plan d'échantillonnage incluant à la fois le toit de la nappe et plusieurs horizons en profondeur peut s'avérer utile pour délimiter plus précisément l'étendue de la pollution sur site, d'autant plus si la composition des sols présente des hétérogénéités en profondeur.

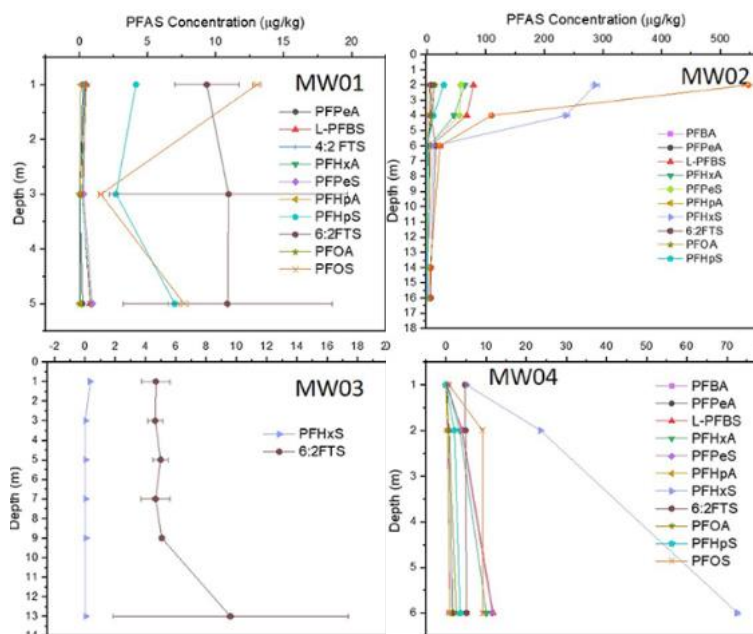


Figure 1 : Exemple de profils verticaux des teneurs en PFAS, mesurées en $\mu\text{g}/\text{kg}$, dans plusieurs piézomètres d'un site pollué par les PFAS en raison de l'utilisation de mousse anti-incendie (modifié d'après Bekele et al., 2020).

2.2. ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS

2.2.1. Positionnement des points d'échantillonnage

Comme pour toutes les stratégies d'échantillonnage déployées pour le diagnostic des sites et sols pollués, la stratégie d'échantillonnage des sols pour le diagnostic des PFAS repose également sur les trois approches complémentaires recommandées par le guide de diagnostic des sites et sols pollués (MTE, 2023) : l'échantillonnage systématique, aléatoire ou dirigé. En pratique, le choix de la stratégie dépend toujours du contexte (superficie de la zone d'étude, activités sur site, etc.) et du degré de connaissances disponibles sur le site. Une combinaison de ces approches s'avère souvent nécessaire.

L'échantillonnage systématique consiste à prélever les sols à intervalles réguliers dans la zone d'étude, selon un maillage prédéfini (ex. : tous les 5 ou 10 mètres, Cf. tableau 1). Cette stratégie est particulièrement pertinente en phase de pré-screening, lorsque le site à diagnostiquer présente une très grande superficie et que la ou les zones sources n'ont pas encore été clairement localisées. Cette méthode permet d'obtenir une première cartographie régulière des teneurs en PFAS sur site et d'identifier d'éventuelles zones sources. Cette stratégie requiert cependant un grand nombre de points d'échantillonnage selon la finesse du maillage retenu.

Sur les sites plus petits, l'**échantillonnage aléatoire** est souvent privilégié. Il consiste à positionner aléatoirement les points de prélèvement sur l'ensemble de la zone étudiée. Cette méthode est particulièrement adaptée aux sites peu documentés et donc aux études exploratoires, où elle permet de réduire le biais de sélection des points d'échantillonnage (approche statistiquement robuste).

Lorsque davantage d'informations sont disponibles sur site (ex : l'emplacement de la source est connu, les zones d'utilisation des PFAS sont identifiées), c'est l'**échantillonnage dirigé (hot**

spot sampling) qui est à privilégier. Il consiste à combiner les deux dernières approches. Le site est d'abord séparé en zones selon les usages ou la distance à la source. Les points d'échantillonnage au sein des zones peuvent ensuite être positionnés soit de manière aléatoire, soit de manière systématique en fonction des connaissances disponibles sur la zone étudiée. La **densité de points d'échantillonnage** est maximisée dans la zone source, où les usages et les risques d'émission de PFAS sont les plus élevés, afin de cartographier l'étendue de la pollution avec la plus grande précision possible. En revanche, la densité de points d'échantillonnage est réduite au minimum dans les zones les plus éloignées des zones d'utilisation ou d'émission connues. Cette stratégie permet d'optimiser les ressources disponibles, mais requiert une bonne connaissance du site. C'est, par exemple, la stratégie la plus couramment observée lors des diagnostics de sites pollués par l'utilisation de mousses anti-incendie (BRGM, 2025).

À noter que les sols agissent comme des « réservoirs de PFAS », alimentant progressivement les eaux souterraines. **Prélever les sols à proximité des ouvrages où les prélèvements d'eau souterraine seront ou ont été réalisés** (voire au même endroit, lors du forage d'un piézomètre, par exemple) relève des bonnes pratiques (Nickerson et al., 2020), puisque cela permet de comparer la signature chimique des deux milieux en un point donné et de mieux caractériser les mécanismes de transfert des PFAS du sol vers la nappe phréatique.

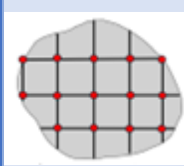
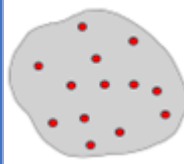
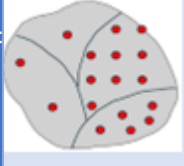
Stratégie d'échantillonnage	Description	Phase de pré-screening sur des sites de grande envergure (zones sources non localisées)	Phase de pré-screening sur des sites de petite envergure (zones sources localisées)	Cartographier précisément la zone source	Exemples d'études
Échantillonnage systématique		Oui	Moins pertinent	Non	(AVINOR, 2012)
Échantillonnage aléatoire		Moins pertinent	Oui	Non	(Fabregat-Palau <i>et al.</i> , 2025 ; Groffen <i>et al.</i> , 2019 ; Johnson, 2022 ; Pritchard <i>et al.</i> , 2026a ; Zweigle <i>et al.</i> , 2023)
Échantillonnage dirigé (hot spot sampling)		Non	Non	Oui	(Filipovic <i>et al.</i> , 2015 ; Kärman <i>et al.</i> , 2011 ; Reinikainen <i>et al.</i> , 2022)

Tableau 1 : Stratégies d'échantillonnage habituellement utilisées sur les sites pollués par les PFAS en France et à l'étranger.

2.2.2. Types et profondeur de prélèvement

Afin de caractériser une pollution des sols par les PFAS lors d'un diagnostic de site, les prélèvements ponctuels sont toujours privilégiés, car ils sont les seuls à permettre de mesurer précisément les concentrations présentes dans les sols à un instant donné, à un emplacement

et à une profondeur précis (Cf. Tableau 2, [norme NF ISO 18400-102](#)). Cette approche est indispensable pour identifier les zones sources et cartographier l'étendue de la pollution : c'est donc cette stratégie qui est utilisée lors des diagnostics de sites pollués par l'utilisation de mousses anti-incendie (ex. : BRGM, 2025 ; ITRC, 2023 ; Kulkarni *et al.*, 2025).

Type d'échantillonnage	Identifier les zones à sélectionner lors d'une phase exploratoire / screening environnemental	Caractériser les teneurs moyennes en PFAS d'une zone en s'affranchissant des variations locales de concentration.	Délimiter l'étendue précise de la pollution	Identifier les risques sanitaires	Exemples d'études
Échantillonnage composite	Oui	Oui	Non	Non	(Dauchy <i>et al.</i> , 2019 ; Reinikainen <i>et al.</i> , 2022, 2019 ; Zweigle <i>et al.</i> , 2023)
Échantillonnage ponctuel ciblé	Oui	Non	Oui	Oui	(Adamson <i>et al.</i> , 2022 ; Ahrens <i>et al.</i> , 2015 ; Anderson <i>et al.</i> , 2016 ; AVINOR, 2012 ; Bräunig <i>et al.</i> , 2017 ; BRGM, 2025 ; Høisæter <i>et al.</i> , 2019 ; Houtz <i>et al.</i> , 2013 ; Kulkarni <i>et al.</i> , 2025 ; Nickerson <i>et al.</i> , 2020 ; SFT, 2008)
Prélèvements de surface à la pelle/truelle (30 ^{er} centimètres)	Oui	Oui	Peut être insuffisant	Oui	(Ahrens <i>et al.</i> , 2015 ; Bräunig <i>et al.</i> , 2017 ; Reinikainen <i>et al.</i> , 2022)
Prélèvements à différentes profondeurs à la tarière ou par sondages carottés.	Oui	Oui	Oui	Non	(AVINOR, 2012 ; Høisæter <i>et al.</i> , 2019 ; Nickerson <i>et al.</i> , 2020 ; Pritchard <i>et al.</i> , 2026b)

Tableau 2 : Types d'échantillons de sol habituellement prélevés sur site en vue de la recherche de PFAS.

Toutefois, les PFAS sont des polluants ubiquistes, susceptibles d'être présents dans les sols et les eaux souterraines, même en dehors de toutes les zones d'utilisation et d'émission de PFAS connues. Ainsi, l'utilisation d'échantillons composites peut être pertinente s'il s'agit d'obtenir une estimation représentative des concentrations de fond en PFAS du site en dehors des zones sources, c'est-à-dire des teneurs en PFAS qui ne sont pas directement liées aux activités historiques ou actuelles du site, mais issues de sources de pollution diffuses et indirectes (ex. : retombées atmosphériques, pollution diffuse liée à d'autres sources présentes à proximité, *etc.*). D'autre part, les échantillons composites sont également utilisés sur site pour obtenir une vision moyenne, représentative des teneurs en PFAS, soit d'un tronçon de sol en profondeur, soit d'une surface donnée, afin de s'affranchir des variations localisées de la distribution des PFAS et d'obtenir une vue d'ensemble. Cependant, cette stratégie n'est utilisée que lors de la phase exploratoire, afin de réaliser un pré-screening de la zone d'étude et d'identifier les zones à sélectionner pour les campagnes suivantes (BRGM, 2025; ITRC, 2023). Ces prélèvements

composites peuvent entraîner une dilution et, par conséquent, une sous-estimation des zones à forte concentration.

Les prélèvements de sol sont généralement effectués en surface (0 - 30 cm) à l'aide d'une pelle ou d'une tarière à main. Dans d'autres contextes, des techniques de forage (ex. : technologies de poussée directe (DPT)) sont parfois utilisées pour accéder à des horizons de sol plus profonds (jusqu'à plusieurs mètres de profondeur ou jusqu'au toit de la nappe phréatique), car certaines familles de PFAS sont susceptibles de migrer verticalement, pouvant rendre les prélèvements de sols superficiels insuffisants pour bien caractériser/délimiter la pollution (INERIS, 2024 ; McGarr *et al.*, 2023). Si les PFAS à chaîne ultra-longue ont tendance à rester plus proches de la surface, les PFAS à chaîne plus courte, plus mobiles, auront tendance à migrer vers les horizons de sol plus profonds (Cf. Figure 2, Bigler *et al.*, 2024).

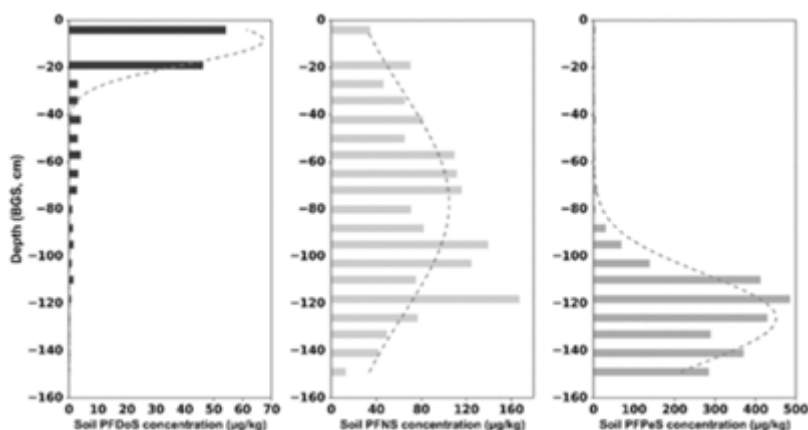


Figure 2 : Exemple d'évolution des teneurs en 3 PFAS dans les sols d'un site impacté par l'utilisation de mousse anti-incendie (d'après Bigler *et al.*, 2024).

Il a également été observé que les teneurs en PFAS peuvent augmenter significativement dans les sols en profondeur si le pH du sol diminue ou si les teneurs en argiles, en calcite et, surtout, en matières organiques augmentent, car ces conditions favorisent l'adsorption et la rétention des PFAS (Adamson *et al.*, 2022 ; Bigler *et al.*, 2024 ; Brusseau et Guo, 2022 ; Høisæter *et al.*, 2019). D'autre part, comme expliqué précédemment, les PFAS présentent à la fois des propriétés hydrophobes, dues à leur chaîne fluorée, et hydrophiles, dues à leurs groupes fonctionnels polaires. Cette dualité favorise leur accumulation dans les sols aux interfaces air/eau, notamment au niveau du toit de la nappe phréatique. Cela peut créer des zones de rétention et de concentration préférentielles des PFAS, rendant l'échantillonnage en profondeur, jusqu'au toit de la nappe, crucial pour bien déterminer l'étendue de la pollution (Brusseau et Guo, 2022). Bien entendu, cette dynamique est site-spécifique puisqu'elle dépend de la composition des sols, de l'occupation des sols en surface ou encore des modalités d'émission des PFAS (McGarr *et al.*, 2023).

Un prélèvement en surface, au point d'exposition, suffit à estimer les risques encourus par les cibles, mais lorsqu'il s'agit de délimiter l'étendue de la pollution et la capacité de transfert des PFAS, les études disponibles montrent qu'il est préférable d'échantillonner les sols à intervalles réguliers le long des profils de forage ou, *a minima*, dans les horizons de sol présentant des particularités susceptibles d'impacter le transfert des PFAS. Les stratégies de diagnostic doivent donc inclure des **carottages profonds et multi-niveaux**, afin de détecter la pollution dans les horizons inférieurs, d'en déterminer l'étendue verticale et d'anticiper la pollution des eaux souterraines.

À noter qu'il est fortement conseillé de **mesurer d'autres paramètres** susceptibles d'impacter le comportement des PFAS pour faciliter l'interprétation des résultats, tels que la teneur en eau et en carbone organique, le pH et la granulométrie du sol. La mesure de la teneur en eau du sol est généralement réalisée d'office pour l'ensemble des prélèvements de sol destinés à l'analyse des PFAS par les laboratoires accrédités, afin d'estimer les concentrations en µg/kg ou en mg/kg de sol sec. À noter qu'en cas de quasi-saturation du sol à la suite d'un épisode pluvieux, il est recommandé, comme pour tous les types de polluants, de reporter le prélèvement de 48 à 72 heures après la fin des précipitations afin de permettre le ressuyage naturel du sol (ou, à défaut, il faut prélever aux profondeurs non affectées). La saturation du sol peut entraîner une dilution des concentrations en PFAS ou favoriser la migration verticale des PFAS (en particulier des composés à chaîne courte), ce qui peut conduire à une sous-estimation de la contamination du milieu, qui correspondrait alors à un état transitoire non représentatif. Il convient de rappeler que, comme pour tous les types de prélèvement, les acteurs sur le terrain doivent documenter précisément les conditions de prélèvement et, si nécessaire, prévoir une campagne complémentaire menée dans des conditions hydriques normales pour valider les données.

3. État des lieux des recommandations appliquées à l'échantillonnage

Afin de garantir la représentativité de l'échantillonnage, plusieurs précautions sont généralement prises lors du prélèvement, qui se traduisent actuellement sous forme de recommandations aux opérateurs des sites et sols pollués pour la préparation des campagnes et des prélèvements. Il est important de préciser que la plupart de ces recommandations sont fondées sur des considérations de principe relatives aux risques de contamination et ne sont pas issues d'études techniques.

De manière générale, concernant les PFAS, 3 types de recommandations existent et concernent différentes étapes de l'échantillonnage :

- le risque de **contamination de l'échantillon par le matériel** utilisé pour l'échantillonnage, par la personne en charge du prélèvement ou lors du transport de l'échantillon (ex : pompe, flaconnage, pelle, tarière, gants, équipement de protection individuelle (EPI), *etc.*) ;
- le risque de **contamination croisée inter-échantillon** lors d'une campagne ou entre plusieurs campagnes ;
- le risque de **transformation ou de perte de l'échantillon lors du transport** (ex. : volatilisation de certaines substances, sorption de certains PFAS sur les parois des flacons lors du transport et du stockage, dégradation de certains PFAS, *etc.*).

Les paragraphes suivants décrivent ces différents risques ainsi que les recommandations émises par la littérature scientifique, les guides et les rapports disponibles afin de les limiter (BAFU, Arcadis, 2021 ; BRGM, 2020 ; CE, 2022 ; Denly *et al.*, 2019 ; EGLE, 2024 ; Field *et al.*, 2021 ; Folorunsho *et al.*, 2024 ; INERIS, 2024 ; ITRC, 2024, 2023 ; Rodowa *et al.*, 2020 ; SCENARIOS, 2023 ; SFSE, 2023 ; UBA, 2022, 2022 ; US-EPA, 2019 ; Wanzek *et al.*, 2024 ; Zenobio *et al.*, 2022 ; Zhang *et al.*, 2024), en précisant si ces risques sont actuellement avérés et appuyés par des données ou s'il ne s'agit pour l'instant que d'un principe de précaution. Pour chaque type de risque, les risques et recommandations associés sont séparés en fonction des acteurs chargés de les respecter (bureaux d'études en charge du prélèvement ou laboratoires en charge de l'analyse), de la matrice ciblée (eau souterraine ou sol) et des substances fluorées concernées (ex. : PFAS à chaînes longues, précurseurs, PFAS volatils).

3.1. RISQUE DE CONTAMINATION DE L'ÉCHANTILLON PAR LE MATÉRIEL UTILISÉ POUR L'ÉCHANTILLONNAGE

Contrairement à d'autres polluants organiques, la présence ubiquiste des PFAS dans de nombreux matériaux utilisés sur le terrain (équipement de sécurité, vêtements imperméables, tuyaux en fluoropolymères, flacons, peintures des pelles, tarières, détergents utilisés pour nettoyer le matériel de terrain, gants en latex, *etc.*) pourrait exposer les prélèvements à un risque de contamination par les PFAS présents dans ces matériaux. C'est pourquoi, par précaution, les recommandations internationales (BRGM, 2020 ; EGLE, 2024 ; ITRC, 2023 ; MPCA, 2022 ; SCENARIOS, 2023 ; SFSE, 2023 ; UBA, 2022 ; US-EPA, 2019) insistent sur l'usage de matériaux certifiés PFAS-free et sur la sélection rigoureuse des contenants et des matériaux à utiliser lors des campagnes d'échantillonnage destinées aux diagnostics des sites pollués par les PFAS. Ainsi, plusieurs fiches visent à synthétiser les bonnes pratiques d'échantillonnage des PFAS (voir les fiches en annexe).

3.1.1. Matériel de terrain utilisé pour le prélèvement

Dans les études disponibles à ce jour, les matériaux contenant du fluor (ex. : PTFE (®Téflon), FEP ou PCTFE), habituellement considérés comme inertes et généralement recommandés pour l'échantillonnage des milieux liés à d'autres familles de polluants, sont systématiquement exclus afin d'éviter de contaminer les échantillons (Cf. Tableau 3 et Tableau 4). Les plastiques, comme le LDPE, sont également évités, ainsi que l'usage de textiles imperméables (type Gore-Tex), de papiers plastifiés ou d'étiquettes adhésives susceptibles de contenir des substances fluorées. La majorité des études consultées déconseille l'usage de gants en latex ou de tout équipement imperméable lors de l'échantillonnage. Ces exigences ne sont pas toujours compatibles avec les normes de sécurité des travailleurs sur le terrain. D'autre part, cela engendre une incompatibilité entre les protocoles d'échantillonnage des PFAS et ceux des autres substances, parfois présentes conjointement et suivies sur site, ce qui empêche la mutualisation des campagnes de prélèvement.

Pourtant, aucune étude ne s'est pour l'instant intéressée à quantifier ce risque de relargage de PFAS depuis le matériel de terrain vers les échantillons de sol. Pour l'échantillonnage de l'eau, une étude montre bien que des concentrations faibles de PFAS (surtout des C₄ et C₅ PFCAs) peuvent être relarguées par différents matériaux d'échantillonnage vers les échantillons d'eau souterraine, notamment les bailers et les tuyaux de pompe en PTFE (Denly et al., 2019). La nature des PFAS relargués et leur concentration dépendent fortement de la composition des différents matériaux et, par conséquent, du fournisseur. En revanche, les tubes en silicone, les sacs de stockage en plastique refermables, les bailers en polyéthylène (PE), les sacs des échantillonneurs à immersion, les tuyaux en PVC et les rubans de niveau d'eau marqués au laser en PVDF n'ont pas relargué de PFAS dans les échantillons d'eau. Il est important de noter que les relargages de PFAS issus de ces matériaux ont été mesurés sur une période de 24 heures en batch, et non dans des conditions de prélèvement normales. Or, dans les conditions de terrain, le temps de contact entre l'eau prélevée et les matériaux cités est nettement inférieur (de quelques secondes à quelques minutes seulement), ce qui peut considérablement limiter le relargage par rapport aux résultats présentés dans cette étude. Les résultats de ces études ne sont donc pas forcément représentatifs de conditions réelles d'échantillonnage.

Par ailleurs, plusieurs études ont été menées dans le cadre d'Aquaref afin d'évaluer les risques de pollution liés à l'échantillonnage des eaux souterraines. Lors de ces essais, diverses pratiques d'échantillonnage ont été testées et leur impact sur les teneurs en PFAS a été évalué. De façon globale, très peu de contaminations liées à la composition du matériel de prélèvement des échantillons ont été observées. Ainsi, dans une étude sur l'impact du matériel de prélèvement des eaux souterraines (Moreau et al., 2024), 55 PFAS ont été surveillés à des limites de quantification très faibles de 0,1 ng/l. Sur les 9 chaînes d'échantillonnage testées (pompes et tuyaux différents), aucune contamination n'a été observée. Les résultats de ces essais sont globalement rassurants : les risques de contamination depuis les matériaux des outils utilisés pour le prélèvement ne sont pas systématiques, y compris lorsque du matériel en PTFE/Téflon a été utilisé. Ces matériaux semblent donc inertes dans les conditions de terrain testées. Il reste cependant difficile d'assurer que ces premiers résultats sont représentatifs de l'ensemble des pratiques, notamment dans le contexte SSP. Il est nécessaire de poursuivre ce type d'étude afin d'apporter des données objectives permettant de formuler des recommandations fondées sur de solides arguments.

Ce relargage peut toutefois concerner les sites où des tuyaux en polyéthylène basse densité (PEBD), en PTFE ou revêtus de PTFE sont stockés dans un puits pendant une période prolongée (Denly et al., 2019) ; dans ces cas, les puits doivent être purgés de manière significative afin d'éliminer les éventuelles contaminations résiduelles provenant de ces matériaux avant de procéder à l'échantillonnage.

Une autre étude plus récente (Rodowa *et al.*, 2020) a analysé une soixantaine de matériaux utilisés pour l'échantillonnage, afin d'y quantifier 52 PFAS et le fluor total. Parmi les 22 matériaux susceptibles d'entrer en contact direct avec les échantillons pendant l'échantillonnage (ex. : sacs plastiques, liners des carottiers, emballage des pelles, *etc.*), aucun ne présentait de concentrations quantifiables de PFAS mesurées de manière routinière. Dix autres matériaux (marqueurs, étiquettes, rubans adhésifs) présentaient bien des concentrations individuelles quantifiables de PFAS (0,45 à 83 µg/m²) et 15 présentaient du fluor total (8000 à > 11 000 000 µg F/m²), mais ces derniers ne sont **jamais en contact avec l'échantillon**, ce qui ne laisse aucune voie plausible de contamination, rendant hautement improbable le relargage de PFAS depuis ces matériaux vers les échantillons. Un double emballage (sachet Ziploc autour du flacon) est d'ailleurs souvent recommandé pour éviter tout contact direct avec l'étiquetage et ainsi réduire le risque de contamination par les colles ou les encres. L'étiquetage se fait donc sur le sachet, et non sur le flacon. Si des étiquettes, marqueurs ou tout autre matériel contenant des PFAS doivent ainsi être manipulés, il faut veiller à changer de gants afin d'éviter qu'ils ne soient contaminés par les PFAS, même si de manière générale, tout contact entre les gants et les échantillons doit être évité pour préserver l'intégrité des échantillons. Les échantillons de sol doivent être, par exemple, transférés dans les flacons à l'aide d'une pelle ou d'une spatule en inox, jamais à la main.

La plupart des recommandations présentées dans les tableaux 3 et 4 reposent donc sur le principe de précaution, sans qu'aucune validation expérimentale systématique ne démontre l'impact de ces pratiques sur les résultats d'analyse. D'autre part, certaines recommandations ciblent **des matériaux qui ne doivent en aucun cas entrer en contact avec l'échantillon lors du prélèvement** (ex. : stylos et bouteilles d'eau minérale en plastique, crème solaire). Ces restrictions imposées aux matériaux de terrain n'entrant pas en contact avec l'échantillon lors de l'échantillonnage ne sont donc pas encore justifiées. Il est vrai que, pour certains polluants organiques (ex. : diclofenac), des travaux ont démontré qu'une contamination de l'échantillon d'eau était possible par l'intermédiaire de l'opérateur s'il avait appliqué de la crème avant l'analyse (Aquaref 2017), même s'il s'était lavé les mains et avait porté des gants, mais ce risque n'a pas encore été démontré pour les PFAS.

Type de matériel	Matériel	Contact avec l'échantillon ?	Recommandés	Non recommandé	Impact mesuré ?	PFAS concernés	Références
Matériel de prélèvement des eaux souterraines	Pompe	OUI	Pompe péristaltique avec tête en acier inoxydable ou en plastique inerte.	Pompes à tête en polymères fluorés (ex. : PTFE, PVDF).	NON	nm	
	Tuyaux et raccords	OUI	Tubes en silicone, en polyéthylène (PE), en polyéthylène haute densité (PEHD) ou en polypropylène (PP).	Polymères fluorés (PTFE/ Téflon, PFA, PVDF, PCTFE, ETFE, ECTFE, FEP) ou pouvant être pollués par des PFAS (additifs), ex. : LDPE	OUI, relargage de 3 à 100 ng/L sur 24h, mais étude peu représentative des conditions de prélèvement sur site.	PTFE : C4-C13 PFCAs LDPE : C4-C5 PFCA majoritaire plus C6-C11 PFCAs	(Denly <i>et al.</i> , 2019)
	Échantillonneurs à immersion	OUI	Acier inoxydable, PP, PEHD avec joints en silicone ou en Éthylène-Propylène-Diene Monomer (EPDM).		NON	nm	
	Bailers	OUI	Bailers en acier inoxydable, en verre borosilicaté ou en PP.		OUI, relargage de 10-70 ng/L sur 24h	C4-C5 PFCAs	(Denly <i>et al.</i> , 2019)
	Cordes (pour bailers et échantillonneurs à immersion)	OUI	Cordes en acier inoxydable, en Kevlar ou en nylon brut (sans revêtement fluoré).	Cordes revêtues d'un revêtement imperméabilisant fluoré.	OUI, relargage de 5-60 ng/L sur 24h	PFBA, PFOA, PFDA, PFHxA, 8:2 FTSA	(Denly <i>et al.</i> , 2019)
Matériel de prélèvement des sols	Pelle, tarière, carottier	OUI	Acier inoxydable, sans peinture ni revêtements anticorrosion.	Outils avec revêtements/peinture anticorrosion et anti-usure.	NON	Relargage depuis les revêtements anticorrosion / anti-usure : FTOH (8:2, 10:2), FTAC, FTS (6:2, 8:2), PFOA, PFOS, GenX, ADONA.	(ECHA, 2025 ; OECD, 2018, 2013 ; USEPA, 2020)
	Huile de foreuse	OUI	Lubrifiants sans PFAS.	Lubrifiants ou graisses fluorées.	NON	PFOS, PFNA, PFDA, FTOH (8:2, 10:2), PFHxA, PFPeA, PFBS, PFHxS.	(DuPont, 2024; ECHA, 2025; OECD, 2018, 2013; USEPA, 2020)
Équipement du personnel de terrain	Équipements de sécurité (EPI)	OUI	Gants en nitrile non poudrés	Gants en latex ou antiadhérents ou imperméabilisés.	NON (relargage > ng/L évoqué)	PFOA, PFOS, PFNA, PFDA, PFHxS	(Denly <i>et al.</i> , 2019 ; ITRC, 2023 ; Rodowa <i>et al.</i> , 2020)
	Vêtements divers de terrain	NON	Vêtements en coton, en laine, en PVC, en néoprène ou en polyuréthane.	Vêtements « traités chimiquement » (ex. : vêtements imperméabilisés) ou lavés avec des adoucisseurs.	NON	Relargage possible de FTOH (6:2,8:2), FTS, PFHxS, PFHxA, PFBS, PFOA, PFOS, diPAP.	(Barzen-Hanson <i>et al.</i> , 2017 ; Schellenberger <i>et al.</i> , 2022 ; USEPA, 2020 ; Yang <i>et al.</i> , 2025 ; Zhou, 2023, 2023)
	Matériel divers de terrain	NON	Stylo-bille, papier ordinaire non traité pour résister aux taches ou à l'eau.	Marqueurs indélébiles, papiers adhésifs, étiquettes, papier, cahiers cartonné imperméabilisés, bouteille en plastique, emballages alimentaires.	NON	Marqueurs : FTOH, FTSA, PFBS. Papiers adhésifs, cartonné et imperméabilisé : FTOH, diPAP, PFOS, PFHxS. Bouteille plastique : PFHxA, PFBS.	(Barzen-Hanson <i>et al.</i> , 2017 ; Denly <i>et al.</i> , 2019 ; Rodowa <i>et al.</i> , 2020 ; Schellenberger <i>et al.</i> , 2022 ; USEPA, 2020 ; Yang <i>et al.</i> , 2025 ; Zhou, 2023, 2023)
	Autres	NON	Citronnelle, crème solaire sans produits fluorés.	Crème solaire, insectifuges, cosmétiques utilisés 24 h avant la campagne.	NON	PFOS, PFOA, FTOH (6:2, 8:2), diPAP, perfluorodecalin, perfluorohexane.	(Barzen-Hanson <i>et al.</i> , 2017 ; Whitehead <i>et al.</i> , 2021)

Tableau 3 : État des lieux des recommandations existantes pour l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines. nm : non mesuré.

3.1.2. Flaconnage

Les échanges menés lors du GT ainsi que l'état des lieux bibliographique (Cf. Tableau 2) démontrent que la majorité des laboratoires français ou étrangers privilégie des flacons en polyéthylène (PE) stériles ou en polyéthylène à haute densité (PEHD) pour les prélèvements d'eau, et des flacons en PEHD ou en verre brun (avec intérieur, bouchons, joints en PE) pour l'échantillonnage des sols. Ces choix sont le plus souvent fondés sur :

- les études bibliographiques disponibles ;
- les normes existantes en France ou à l'étranger : (ex. : NF EN 17892 7.1, 2024, ASTM D7968-17a, 2023 ; ASTM D7979-20, 2020 ; ISO 21675, 2019 ; ISO 25101 : 2009, 2009 ; US EPA, 2022, 2018) ;
- et des contrôles de lots et de flaconnage effectués en interne dans chaque laboratoire afin de vérifier l'absence de relargage de PFAS du flacon vers l'échantillon et/ou d'évaluer la sorption des PFAS de l'échantillon aux parois du flacon.

Par exemple, la norme NF EN 17892 (2024) portant sur la détermination de substances per- et polyfluoroalkylées sélectionnées dans l'eau potable autorise les récipients d'échantillonnage pour les PFAS en polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS) ou en polyéthylène téréphtalate (PET), équipés de bouchons à visser hermétiques. Il est précisé que ces matériaux doivent être neufs, sans additifs (ni plastifiants ni agents anti-UV). Afin de limiter le risque de contamination croisée, le recours au jetable est très fortement recommandé. Le verre est également autorisé (pour les échantillons de 100 ml), mais à condition d'être traité (ex. : silanisé) afin de limiter l'adsorption des PFAS sur les parois du flacon. Des flacons opaques sont souvent utilisés pour prévenir la photodégradation des PFAS lors du transport, bien que celle-ci n'ait encore jamais été démontrée.

a) Pour les laboratoires

À noter que la qualité du PE, PP, PS *etc.* destiné au flaconnage n'est pas toujours la même et que les résultats des essais peuvent donc varier d'un lot à l'autre et d'un fournisseur à l'autre. Il est donc important pour les laboratoires de procéder à des contrôles de lots à la réception des flaconnages. Il est primordial de noter que la nature du flaconnage semble influencer davantage sur les phénomènes de sorption des PFAS aux parois que sur le relargage réel des substances dans l'échantillon. Par exemple, des effets de sorption de certains PFAS depuis des échantillons aqueux (notamment des PFAS à chaînes longues) aux parois des flacons ont été démontrés. Ces effets, bien que systématiquement présents, semblent renforcés à des températures ≥ 4 °C. Ces effets de sorption ont été observés pour tous types de contenants, et apparaissent plus importants tantôt pour le verre non borosilicaté, tantôt pour le polypropylène (PP), et le polyéthylène haute densité (HDPE) avec dans l'ordre des effets de sorption du plus fort à plus faible : le PP > HDPE > Polyéthylène Téréphtalate (PET) > verre > polystyrène (PS). Ainsi, selon les études, il est parfois recommandé d'utiliser du verre et du polystyrène pour limiter les effets de sorption, tandis que, dans d'autres, c'est le PP et le HDPE qui sont recommandés (Folorunsho *et al.*, 2025, 2024 ; Lath *et al.*, 2019 ; Zenobio *et al.*, 2022). Durant ces études, ces phénomènes d'adsorption ont entraîné des pertes de l'ordre de 0,2 à 0,7 ng/L pour les PFAS à chaînes courtes, jusqu'à 2 ng/L pour les PFAS à chaînes longues et les précurseurs (Folorunsho *et al.*, 2025, 2024 ; Zenobio *et al.*, 2022).

En réalité, ces effets de sorption sont toujours présents et variables non seulement en fonction de la nature du flacon, mais aussi, pour une même nature de flacon, en fonction du fournisseur et des lots de flacons étudiés, ce qui explique la variabilité des résultats obtenus dans ces publications. Cet effet de sorption dépend de la longueur des chaînes carbonées des PFAS mais

aussi de leur groupement fonctionnel ; la sorption est généralement plus forte pour les acides perfluorosulfoniques (PFASs) que pour les acides perfluoro-carboxyliques (PFCAs) à longueur de chaîne équivalente (Lath *et al.*, 2019 ; Zenobio *et al.*, 2022 ; Zhang *et al.*, 2024).

Les laboratoires présents lors des échanges menés dans le cadre du groupe de travail « échantillonnage PFAS » ont confirmé que la sorption des PFAS sur les parois des flacons est un phénomène bien établi et maîtrisé. Pour y remédier, tous les laboratoires interrogés appliquent des **protocoles visant à récupérer les PFAS adsorbés**, principalement par rinçage des flacons au méthanol. Cette étape est considérée comme essentielle et conforme aux pratiques normalisées. Le principe consiste à utiliser l'intégralité du contenu du flacon, puis à le rincer avec du méthanol afin de garantir la récupération complète des PFAS retenus sur ses parois. Ces protocoles sont établis à partir de tests internes portant sur différents types de flaconnage. Dans d'autres protocoles analytiques, du méthanol est ajouté directement dans le flacon avec l'échantillon, et l'analyse se fait sur ce mélange échantillon-méthanol, ce qui permet de limiter ou de supprimer l'adsorption aux parois du flacon.

b) Personnel en charge du prélèvement

Pour toutes les raisons présentées précédemment, il est recommandé aux acteurs en charge des prélèvements de suivre les recommandations du laboratoire concernant le flaconnage à utiliser. De plus, le flacon doit être rempli conformément aux prescriptions du laboratoire.

Type de matériel	Matériel	En contact avec l'échantillon ?	Recommandés	Non recommandé	Impact mesuré ?	PFAS concernés	Références
Contenants utilisés pour les échantillons	Flaconnages pour les prélèvements de sols et d'eaux souterraines	OUI	PE, PVS, PETP, PPS, PEEK, PA (nylon), acier inoxydable, silicone, verre traité ou silanisé	Polymères fluorés : PTFE, PVDF, PCTFE, ETFE, ECTFE, FEP ; Polymère pouvant être pollués par des PFAS (additifs) : LDPE	Relargage : NON pour les sols. OUI Pour l'eau, relargage de 0,01 à 10 ng/L évoqués	Relargage de PFBA, PFHxA ; PFOA, FTOH (6:2, 6:2)	(US-EPA, 2019; Waters Corp., 2023)
	Sacs en plastique pour les prélèvements de sols.	OUI	Privilégier les contenants en PE, en PEHD et en verre.	Éviter les sacs ou sachets en plastique souple.	NON	Relargage possible de FTOH (6:2;8:2), FTS, PFHxS, PFHxA, PFBS, PFOA, PFOS, diPAP.	(Barzen-Hanson et al., 2017 ; Rodowa et al., 2020 ; Schellenberger et al., 2022 ; USEPA, 2020 ; Yang et al., 2025 ; Zhou, 2023, 2023)
	Flaconnage pour le prélèvement de PFAS volatils	OUI	Flacons sans espace de tête (headspace) pour limiter la volatilisation, fermés avec des capsules étanches (joint en aluminium ou en silicone).	Flacons standards avec espace de tête.	NON, risque de perte de PFAS volatils.	PFAS volatils : ex : FTOH (6:2, 8:2, 10:2)	(ASTM, 2001 ; ISO 22155, 2016 ; RECORD, 2024)

Tableau 4 : État des lieux des recommandations existantes sur l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines dans la littérature. nm : non mesuré.

3.2. RISQUES DE CONTAMINATION CROISÉE (INTER-ÉCHANTILLONS)

3.2.1. Personnel en charge du prélèvement

Comme pour toute pollution organique, les protocoles disponibles insistent sur des procédures de nettoyage strictes afin d'éviter toute contamination croisée entre les échantillons prélevés lors des campagnes d'échantillonnage des sols et des eaux souterraines en vue de la recherche de PFAS (Cf. Tableau 5) (CALIFORNIA STATE WATER QUALITY CONTROL BOARD, 2020 ; ITRC, 2024 ; MPCA, 2022 ; US EPA, 2025). Ainsi, il est fortement recommandé au personnel en charge du prélèvement de décontaminer soigneusement le matériel d'échantillonnage avant de le déplacer vers une nouvelle zone d'investigation, ainsi qu'entre les différents points d'échantillonnage. L'ensemble du matériel d'échantillonnage sur le terrain, utilisé à chaque point d'échantillonnage (dont les appareils de mesure et les indicateurs de niveau d'eau), doit être nettoyé entre chaque utilisation, en mettant l'accent sur les surfaces entrant en contact direct avec l'échantillon.

Le matériel est généralement nettoyé par des rinçages successifs avec une eau exempte de PFAS (eau déionisée ou eau potable, après vérification des teneurs en PFAS pour les équipements volumineux, comme les équipements de forage) ou à l'aide de détergents (vérifiés afin de s'assurer que les tensioactifs fluorés ne figurent pas parmi les ingrédients listés dans la fiche de données de sécurité), puis au méthanol ou à un solvant approprié. Ces solutions doivent être conservées dans des bidons neufs, exempts de produits fluorés tels que le PEHD. Un dernier rinçage final avec de l'eau ultrapure, certifiée sans PFAS et vérifiée en laboratoire, est parfois effectué pour le matériel de petite taille, mais n'est pas toujours applicable. Les flacons fournis par les laboratoires, préconditionnés et certifiés, ne doivent pas être réutilisés. Lors des prélèvements d'eau souterraine, le matériel doit être rincé avec l'eau du puits. Excepté dans certains cas particuliers (ouvrages très ou pas assez productifs, Cf. norme NF X31-615 (2026)), une purge préalable du puits est fortement conseillée jusqu'à la stabilisation des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, oxygène dissous) (ou par le renouvellement de plusieurs volumes) afin d'obtenir un échantillon représentatif. Si un tel nettoyage n'est pas possible entre les points de prélèvement sur site, il est recommandé d'échantillonner des zones des moins aux plus polluées, lorsque cette information est disponible.

Enfin, des contrôles qualité, tels que les blancs de terrain, sont très souvent exigés afin d'alerter sur la représentativité des résultats d'analyse en cas de contamination croisée. Ces blancs consistent en un prélèvement d'une eau exempte de PFAS ou de sols non pollués par les PFAS (sols ou terres issus d'un autre site, ou d'une zone non impactée sur site, si possible), avec le même matériel que celui qui sera utilisé pour le prélèvement lors de la campagne (même pelle, tarière, pompe, tuyaux, bailers, flacon, etc.). L'eau utilisée pour les blancs de contrôle qualité sur le terrain (par exemple, les blancs de terrain et de décontamination) est parfois fournie par le laboratoire chargé de l'analyse. À noter cependant que la réalisation de blancs de contrôle est quasiment impossible sur site pour les pompes, car elle nécessite des volumes d'eau très importants. Dans ce cas, il est conseillé de tester son matériel en amont de la campagne en prélevant avec la pompe une eau connue sans PFAS à envoyer à l'analyse.

Type de pratique de nettoyage	Pratique	Recommandés	Non recommandé	Impact mesuré ?	PFAS concernés	Références
Nature des produits utilisés pour le nettoyage	Détergents	Détergents ou solution sans produits fluorés (ex.: mélange de méthanol ou d'éthanol/eau (70/30).	Détergents utilisant des substances fluorées.	NON, pas de données	Les détergents pourraient relarguer : FTOH (6:2, 8:2), FTS (6:2), diPAP, PFHxS, PFBS, PFOA, PFNA.	(RECORD, 2024 ; USEPA, 2020)
	Eau	Eau ultrapure déionisée certifiée sans PFAS.	Eau ultrapure non certifiée sans PFAS.	NON, pas de données	Présence à l'état de traces de : PFOS, PFOS, PFHxA, PFPeA, PFBS, GenX, ADONA à des concentrations de 1 à 10 ng/L.	(RECORD, 2024 ; USEPA, 2020)
Protocole de nettoyage	Fréquence	Nettoyage (au moins 3 rinçages) de l'ensemble du matériel de prélèvement avant et entre chaque prélèvement.	Absence de nettoyage entre les points et, a minima, entre les campagnes d'échantillonnage.	TRÈS PROBABLE, pratiques similaires pour tous types de pollution organiques	Tous	Valable pour tous les types de polluants (NF X31-620, 2021) (US EPA, 2022)
	Stratégie	Prélèvement d'échantillons dans les zones a priori des moins concentrées aux plus concentrées.	Prélèvement des échantillons dans un ordre aléatoire.	TRÈS PROBABLE, pratiques similaires pour tous types de pollution organiques	Tous	

Tableau 5 : État des lieux des recommandations issues de la portant sur les pratiques de nettoyage du matériel de terrain servant à l'échantillonnage des sols et des eaux souterraines pour le diagnostic des sites pollués par les PFAS.Laboratoires.

L'ensemble des laboratoires interrogés au sein du groupe de travail met en évidence l'importance de réaliser des contrôles qualité internes pour éviter les contaminations croisées ou, à défaut, les détecter. Ainsi, des blancs de préparation et d'analyse sont systématiquement réalisés au laboratoire. D'autre part, comme pour tous les types d'échantillons, l'intégrité des échantillons doit être vérifiée lors de leur arrivée au laboratoire, et toute anomalie risquant d'entacher la représentativité du résultat d'analyse doit être notée (ex. : casse, fuite des pains de glace chimique, etc.).

3.3. TRANSPORT ET CONSERVATION

3.3.1. Personnel en charge du prélèvement

Il revient au personnel en charge des prélèvements de faire parvenir les échantillons au laboratoire le plus rapidement possible, en veillant à ce qu'ils soient conservés au frais (en glacière *a minima*) et à l'abri de la lumière pendant le transport. Les échantillons doivent être conservés dans les conditions les plus froides possibles (< 8 °C) pour garantir leur acceptation par le laboratoire. En effet, les laboratoires sont soumis à des normes et à des accréditations qui leur imposent de vérifier la température des échantillons à leur réception. Si les conditions de conservation ne sont pas respectées, les laboratoires sont en droit de refuser les échantillons ou

d'émettre une réserve quant à la représentativité des résultats d'analyse. Comme indiqué dans la norme NF X31-615 (mise à jour en 2026), il est recommandé de faire parvenir les échantillons au laboratoire le plus rapidement possible, généralement dans les 24 à 48 h suivant le prélèvement.

Un double emballage (sachet Ziploc autour du flacon) est parfois recommandé pour éviter tout contact direct entre l'échantillon et les pains de glace durant le transport et permettre un étiquetage sans risque de pollution par les colles ou les encres (US EPA, Method 1633, 2022). L'étiquetage se fait donc souvent sur le sachet, et non sur le flacon, bien que, normalement, les encres et les étiquettes ne puissent pas entrer en contact direct avec les échantillons prélevés. Comme mentionné précédemment, il est préférable, *a minima*, de changer de gants après avoir manipulé les étiquettes afin d'éviter tout transfert vers les échantillons, même si ce risque n'a pas encore été démontré. Il est rappelé qu'il convient de limiter au maximum la manipulation directe des échantillons.

3.3.2. Laboratoires

Les pratiques des laboratoires en charge des analyses des échantillons et interrogés lors de ce groupe de travail sont toutes alignées sur les normes existantes, classiquement mises en œuvre pour la conservation des échantillons destinés à l'analyse des polluants organiques. Ainsi, la conservation des échantillons d'eau se fait au frais à 4°C (± 3 °C) jusqu'à ce qu'ils soient traités pour une durée n'excédant pas 60 jours. Pour les sols, la conservation suit également les pratiques classiques des analyses organiques, c'est-à-dire un stockage au frais à 4 °C (± 3 °C) sans congélation. Les durées retenues sont généralement de 28 jours maximum, conformément aux indications issues de travaux normatifs.

Type de recommandation	Recommandé	Non recommandé	Type de risque	Impact mesuré ?	PFAS concernés	Références
Température et durée de conservation des échantillons au laboratoire	≤ 6 °C pour une durée de conservation > 14 jours	Température supérieure à 6 °C (sauf si l'analyse est effectuée dans les 24 h).	Volatilisation des PFAS depuis le sol.	NON	6:2 FTOH, 8:2 FTOH, PFAS volatiles	(Zhang <i>et al.</i> , 2024)
			Adsorption des PFAS sur les parois du contenant.	OUI	PFAS à chaînes longues (> C8).	(Folorunsho <i>et al.</i> , 2024 ; Zenobio <i>et al.</i> , 2022)
Exposition à la lumière	Éviter l'exposition directe aux UV en utilisant des contenants opaques.	Conserver les échantillons à la lumière et dans des contenants non opaques.	Dégradation ou transformation de certains PFAS.	NON	nm	(US EPA, 2022)
Matériel utilisé pour le transport	Pains de glace « durs »	Pains de glace chimique	Risque de fuite des gels réfrigérants	NON, les pains de glace ne doivent pas entrer en contact direct avec les échantillons.	FTOHs, PFBA, PFPeA, MeFOSAA et EtFOSAA	(INERIS, 2024, US EPA 2022)

Tableau 6 : État des lieux des recommandations concernant le transport et la conservation des échantillons d'eau et de sol.

Cette chaîne du froid doit permettre de limiter les transformations chimiques, la sorption sur les parois des contenants et la volatilisation de certains composés, tels que les FTOHs. La cinétique d'adsorption est effectivement ralentie à basse température, car le refroidissement réduit

l'agitation moléculaire, ce qui diminue la probabilité d'interaction entre les molécules de PFAS et les parois du flacon (US EPA, Method 1633 2022). Les délais recommandés entre l'échantillonnage et l'analyse dans la littérature scientifique sont de 14 jours pour l'extraction et de 28 jours pour l'analyse (Cf. Tableau 6, Folorunsho *et al.*, 2024). La Norme NF EN 17892 (2024) précise que l'échantillon d'eau, s'il est conservé à $4\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ peut être conservé pour une durée ne dépassant pas 60 jours avant d'être analysé. Au-delà, l'échantillon peut être congelé et conservé à une température $\leq -15\text{ °C}$ pendant un maximum de 180 jours. Ces délais visent à préserver l'intégrité des échantillons et à éviter les biais liés à la dégradation ou à la perte de composés. Deux études récentes ont montré que les conditions de stockage (température, durée, type de flaconnage) peuvent entraîner des pertes significatives de PFAS, pouvant atteindre 50 % pour certains PFAS à chaîne longue, notamment en raison de leur sorption accrue sur les parois du flacon (Folorunsho *et al.*, 2024 ; Zenobio *et al.*, 2022). Les laboratoires doivent donc impérativement mettre en place des stratégies spécifiques pour récupérer les PFAS adsorbés sur les contenants, soit par rinçage des flacons au solvant (méthanol en général), soit par ajout du solvant directement dans l'échantillon (méthodes par injection directe). Cette recommandation de récupération des PFAS adsorbés sur le flaconnage (quel qu'il soit) est notamment décrite dans la norme NF EN 17892 (juin 2024, Qualité de l'eau - Détermination de substances per- et polyfluoroalkylées sélectionnées dans l'eau potable - Méthode par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS)).

3.4. AUTRES RECOMMANDATIONS

3.4.1. Communication avec le laboratoire d'analyse

La communication entre le personnel chargé du prélèvement et le laboratoire, avant et après le prélèvement des échantillons, demeure primordiale pour garantir la qualité des résultats d'analyse. À noter que si un échantillon provient d'une zone connue ou soupçonnée d'être fortement contaminée par des PFAS, il est important d'en **informer le laboratoire afin** qu'il puisse choisir les procédures de préparation adéquates et éviter la contamination de son équipement de laboratoire ainsi que celle des autres échantillons prélevés sur le terrain et acheminés au laboratoire.

3.4.2. Réalisation de duplicatas d'échantillonnage

En fonction des objectifs et des enjeux de l'étude, la réalisation de duplicatas peut s'avérer utile pour contrôler les opérations d'échantillonnage (répétabilité des mesures, risques de contamination, *etc.*). Il s'agit d'échantillons prélevés au même moment et au même endroit, dans des conditions identiques et traités de manière identique tout au long des procédures sur le terrain et en laboratoire. La comparaison des résultats d'analyses de ces duplicatas peut permettre d'évaluer la fiabilité des méthodes de prélèvement, de conservation, de stockage et d'analyse en laboratoire.

4. Conclusions

Cet état des lieux des pratiques d'échantillonnage montre que les stratégies d'échantillonnage de l'eau et des sols mises en œuvre pour diagnostiquer la présence de PFAS sur site ne présentent aucune différence fondamentale par rapport à celles appliquées aux autres pollutions organiques. Conformément aux principes de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, la démarche proposée dépend toujours du contexte du site (ex. : activité, connaissance ou non des zones sources, etc.), des objectifs de l'étude et des caractéristiques propres aux substances recherchées. Ainsi, même si les PFAS présentent des comportements environnementaux spécifiques, leur prise en compte s'intègre naturellement au cadre méthodologique existant, sans nécessiter de stratégie distincte.

Comme cela a été largement démontré, les PFAS présentent une forte capacité à migrer en profondeur dans les sols et à s'accumuler aux interfaces air/eau, avec des comportements qui varient selon la longueur de leur chaîne carbonée, leurs groupements fonctionnels et des paramètres environnementaux (composition de l'eau, des sols, notamment du pH). Ces facteurs combinés peuvent conduire à des profils de distribution verticale des teneurs en PFAS très contrastés, tant dans les sols que dans les eaux souterraines. Dans ce contexte, il est vivement recommandé de prévoir des prélèvements multiniveaux, en particulier sur les sites présentant une hétérogénéité marquée de la composition des sols en profondeur, afin de délimiter au mieux l'étendue de la pollution.

L'une des particularités majeures des PFAS réside dans l'abondance de recommandations spécifiques relatives aux pratiques d'échantillonnage. En raison de leur résistance chimique, de leur mobilité élevée et de leur présence dans de nombreux matériaux et produits du quotidien, de nombreux guides techniques — nationaux comme internationaux — ont détaillé des précautions particulières à respecter lors des prélèvements afin de limiter le risque de contamination des échantillons et de garantir la fiabilité des résultats. Les échanges avec les acteurs sur le terrain montrent que le coût des recommandations actuellement proposées constitue un frein majeur à la mise en œuvre des campagnes de prélèvement destinées à la surveillance des PFAS, notamment en l'absence d'obligation réglementaire. En effet, l'application stricte de l'ensemble des recommandations en vigueur pour les protocoles d'échantillonnage entraîne un surcoût important et un délai supplémentaire pour l'échantillonnage, liés, par exemple :

- au besoin de nettoyer le matériel de prélèvement entre chaque prélèvement ;
- à l'incompatibilité entre les protocoles recommandés pour les PFAS et ceux appliqués à l'échantillonnage des autres polluants organiques car ils nécessitent l'achat de nouveaux équipements dédiés et la réalisation de campagnes distinctes. Par exemple, le PTFE est souvent recommandé dans les protocoles classiques d'échantillonnage de nombreux polluants organiques (ex. : HAP, PCB, solvants chlorés), dans les joints et bouchons des flacons, les tuyaux des pompes de prélèvement, car il est chimiquement inerte et résistant, mais il doit être évité pour les prélèvements dédiés aux PFAS. Ainsi, il faut compter de 1 000 à 5 000 euros de plus pour une campagne PFAS pour le rachat de matériel et de consommables spécifiques sans PFAS parfois à changer entre chaque campagne (pompes, tuyaux, raccords, EPI dédiés, etc.).

Il faut compter en moyenne 20 à 45 minutes de plus par prélèvement, par rapport à un prélèvement classique, si l'on inclut le temps de préparation supplémentaire en amont de la campagne et le nettoyage du matériel. Cela se rajoute au coût déjà très élevé des analyses

(compter en moyenne 550 euros pour les sols et 300 à 450 euros pour les eaux, par échantillon, pour une analyse ciblée de 20 à 30 composés). La mise en pratique de l'ensemble de ces recommandations paraît donc difficile, d'autant plus que trop peu de données sont disponibles à ce jour pour estimer l'impact réel de ces pratiques sur les résultats d'analyse. Il semble donc indispensable de hiérarchiser ces recommandations au regard des risques identifiés à partir de données réelles.

Il ressort du présent état des lieux un besoin clair d'harmonisation méthodologique des pratiques, ainsi qu'un besoin d'acquisition de données afin de préciser si ces pratiques peuvent avoir un impact significatif sur le résultat d'analyse dans le contexte et pour la matrice ciblée. Des premières études menées au niveau national par Aquaref, dans un contexte de surveillance des milieux (blancs terrain, essais d'intercomparaison), montrent un impact quasi inexistant des opérations d'échantillonnage en termes notamment de risques de contamination. D'autres études sont nécessaires pour confirmer ces résultats, notamment dans le contexte des sites et sols pollués. Ainsi, en attendant la collecte de données supplémentaires, les futurs efforts doivent se concentrer principalement sur les matériaux entrant en contact direct avec les échantillons de terrain et pour lesquels des risques ont déjà été démontrés pour les PFAS ou pour d'autres pollutions organiques.

Il est donc conseillé de :

- respecter les consignes du laboratoire en termes de conditionnement et de transport (flaconnage, consignes de remplissage, délais de conservation, chaîne du froid, etc.) ;
- tester son matériel de terrain habituel par des essais en interne (ex. : blancs) afin de vérifier le risque de contamination.

Et comme pour tous les types de pollution organique :

- veiller à nettoyer l'ensemble du matériel de terrain le plus souvent possible, et a minima entre chaque campagne de prélèvement, avec de l'eau ou des détergents non fluoré ;
- prélever des zones les moins concentrées vers les zones les plus concentrées ;
- limiter les délais de transmission des échantillons au laboratoire à moins de 48 h suivant le prélèvement (envoi le jour même et réception par le laboratoire dès le lendemain, si possible) ;
- veillez à ce que les échantillons soient conservés en glacière dans les conditions les plus fraîches possibles durant le transport (si possible $< 8^{\circ}\text{C}$) ;
- une fois au laboratoire, les échantillons doivent être conservés à 4°C ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) et, de préférence, analysés dans un délai de moins de 28 jours.

Enfin, les précautions à prendre, notamment parce qu'elles sont coûteuses et parfois complexes à mettre en œuvre, doivent être proportionnées aux contraintes liées aux limites de quantification. La mise en œuvre des précautions strictes lors du prélèvement et de la manipulation des échantillons destinés à l'analyse des PFAS, comme l'utilisation de matériel dédié sans fluor, semble essentielle pour garantir la fiabilité des résultats lorsque les limites de quantification (LQ) recherchées et les concentrations attendues sont très basses (de l'ordre de 0,1 à 0,5 ng/L). Dans ce contexte, toute contamination, même minime, pourrait fausser de manière significative les résultats d'une étude. En revanche, pour des études visant des LQ moins exigeantes et des teneurs en PFAS plus élevées (LQ de 5 à 10 ng/L ; concentrations de l'ordre de la dizaine de $\mu\text{g/L}$ ou de $\mu\text{g/kg}$), par exemple dans le cadre d'un diagnostic préalable sur un site fortement pollué, le risque lié à une contamination croisée, bien que réel, peut avoir un impact moindre sur les conclusions globales de l'étude (même si elles resteraient à l'origine de résultats biaisés). Cependant, il convient de souligner que l'ampleur exacte des teneurs en PFAS attendues

demeure souvent difficile à quantifier *a priori*, ce qui complique le rôle de conseil des bureaux d'études et la prise de décision des maîtres d'ouvrage. En l'absence de données précises sur les niveaux de contamination susceptibles d'être associés à chaque étape de la chaîne d'échantillonnage et de protocoles d'échantillonnage harmonisés, il n'est pas toujours possible d'évaluer si un assouplissement partiel de certaines des recommandations les plus strictes est acceptable sans compromettre l'intégrité des résultats.

5. 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.

AFNOR (2017) - NF ISO 18400-102 : Qualité du sol – Échantillonnage – Partie 102 : Choix et application des techniques d'échantillonnage.

AFNOR (2026) - NF X31-615 : Qualité des sols – Méthodes de détection, de caractérisation et de surveillance des pollutions en nappe – Prélèvement et échantillonnage des eaux souterraines dans des forages de surveillance pour la détermination de la qualité des eaux souterraines

AFNOR (2021) - NF X31-620-2 : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle.

AFNOR (2024). NF EN 17892 : Qualité de l'eau – Détermination de substances per- et polyfluoroalkylées sélectionnées dans l'eau potable – Méthode LC-MS/MS.

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.

AQUAREF, Ferret C. et Lepot B. – Impact de la nature du matériel d'échantillonnage sur la qualité des données de surveillance du diclofénac dans les eaux de surface– Rapport AQUAREF 2017 – 21 p (+ annexes).

ASTM (2001) - ASTM D5466- Standard Practice for Sampling Volatile Organic Compounds in Soil.

ASTM D7968-17a (2023) - Standard Test Method for Determination of Polyfluorinated Compounds in Soil by Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry (LC/MS/MS).

ASTM D7979-20 (2020) - Method D7979 for PFAS in non-potable waters | Agilent.

AVINOR (2012) - Miljøprosjektet – DP 2: Miljøtekniske grunnundersøkelser ved Avinors flyplasser. (No. 168180–1). SWECO/AVINOR.

BAFU, Arcadis (2021) – Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz: Expertenbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Barzen-Hanson K.A., Roberts S.C., Choyke S., Oetjen K., McAlees A., Riddell N., McCrindle R., Ferguson P.L., Higgins C.P., Field J.A. (2017) - Discovery of 40 classes of per-and polyfluoroalkyl substances in historical aqueous film-forming foams (AFFFs) and AFFF-impacted groundwater. *Environmental science & technology* 51, 2047–2057.

Bekele D.N., Liu Y., Donaghey M., Umeh A., Arachchige C.S.V., Chadalavada S., Naidu R. (2020) - Separation and Lithological Mapping of PFAS Mixtures in the Vadose Zone at a Contaminated Site. *Front. Water* 2. <https://doi.org/10.3389/frwa.2020.597810>.

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 (2025) - État des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie (No. RP-73924-FR).

BRGM (2022) - Guide technique sur l'échantillonnage des sols pour la recherche de composés organiques volatils et semi-volatils. (No. RP-70901-FR).

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

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>.

Brusseau M.L., Guo B. (2020) - PFAS Retention and Leaching in Soils & the Vadose Zone, in: AGU Fall Meeting Abstracts. pp. GH014-0002.

CALIFORNIA STATE WATER QUALITY CONTROL BOARD (2020) - Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Sampling Guidelines for Non-Drinking Water.

CE (2022) - Publication d'une recommandation et d'un règlement d'application sur les analyses des PFAS.

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

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.

Dunn M., Becanova J., Vojta S., Pickard H., Lohmann R. (2025) - Perfluorinated Carbon Chain Length Drives Uptake of Diverse Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Field-Deployed Passive Samplers. *ACS EST Water* 5, 1803–1813. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c01164>.

DuPont (2024) - Krytox® Performance Lubricants – Technical Data Sheets.

ECHA (2025) - REACH Registration Dossiers for FTOH and FTAC.

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

Fabregat-Palau J., Zweigle J., Renner D., Zwiener C., Grathwohl P. (2025) - Assessment of PFAS contamination in agricultural soils: Non-target identification of precursors, fluorine mass balance and microcosm studies. *Journal of Hazardous Materials* 490, 137798. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137798>.

Field J., Schwichtenberg T., Rula A.D., Hawley E.L., Saylor 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.

Folorunsho O., Bogush A., Kourtchev I. (2025) - Investigation of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Adsorption onto the Medium Size Quartz Gravel. *Environmental Contamination: Causes and Solutions* 1, 2508001157.

Folorunsho O., Kizhakkethil J.P., Bogush A., Kourtchev I. (2024) - Effect of short-term sample storage and preparatory conditions on losses of 18 per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to container materials. *Chemosphere* 363, 142814.

Groffen T., Rijnders J., Verbrigghe N., Verbruggen E., Prinsen E., Eens M., Bervoets L. (2019) - Influence of soil physicochemical properties on the depth profiles of perfluoroalkylated acids (PFAAs) in soil along a distance gradient from a fluorochemical plant and associations with soil microbial parameters. *Chemosphere* 236, 124407. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124407>.

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.

INERIS (2024) - Comportement des substances per et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les sols et les eaux souterraines Rapport d'avancement : travaux expérimentaux menés par l'Ineris en 2024 et perspectives (No. 227153-2820038- v1.0).

ISO 21675 (2019) - Water quality – Determination of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water – Method using solid phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS).

ISO 22155 (2016) - ISO 22155 – Soil quality – Sampling of volatile organic compounds – Standard practice.

ISO 25101:2009 (2009) - Qualité de l'eau – Détermination du sulfonate de perfluorooctane (PFOS) et de l'octanoate perfluoré (PFOA) – Méthode par extraction en phase solide et chromatographie liquide/spectrométrie de masse pour des échantillons non filtrés.

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

ITRC (2023) - PFAS Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1. Interstate Technology and Regulatory Council, PFAS Team.

Johnson G.R. (2022) - PFAS in soil and groundwater following historical land application of biosolids. *Water Research* 211, 118035. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118035>.

Kaltenberg E.M., Dasu K., Lefkovitz L.F., Thorn J., Schumitz D. (2023) - Sampling of freely dissolved per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in surface water and groundwater using a newly developed passive sampler. *Environmental Pollution* 318, 120940. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120940>.

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.

Kulkarni P.R., Andrzejczyk N.E., Gavaskar A., Cartwright A., Adamson D.T., Cook J., Newell C.J. (2025) - Characteristics of aqueous film forming foam (AFFF) sites impacted with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A 37-site study. *Water Research* 285, 124124. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124124>.

Lath S., Knight E.R., Navarro D.A., Kookana R.S., McLaughlin M.J. (2019) - Sorption of PFOA onto different laboratory materials: Filter membranes and centrifuge tubes. *Chemosphere* 222, 671–678.

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.

McDermott K.S., Guelfo J., Anderson T.A., Reible D., Jackson A.W. (2022) - The development of diffusive equilibrium, high-resolution passive samplers to measure perfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater. *Chemosphere* 303, 134686. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134686>.

McGarr J.T., Mbonimpa E.G., McAvoy D.C., Soltanian M.R. (2023) - Fate and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) at aqueous film forming foam (AFFF) discharge sites: A review. *Soil Systems* 7, 53.

MPCA (2022) - Guidance for Per- and Polyfluoroalkyl substances (PFAS): Sampling.

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

Nickerson A., Maizel A.C., Kulkarni P.R., Adamson D.T., Kornuc J.J., Higgins C.P. (2020) - Enhanced extraction of AFFF-associated PFASs from source zone soils. *Environmental science & technology* 54, 4952–4962.

OECD (2018) - Toward a New Comprehensive Global Database of PFASs: Summary Report on Updating the OECD List of PFASs. Organisation for Economic Co-operation and Development.

OECD (2013) - Synthesis paper on per and polyfluorinated chemicals [WWW Document]. URL https://www.oecd.org/en/publications/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals_0bc75123-en.html (accessed 7.18.25).

Pritchard J.C., Hire M., McDonough J., Higgins C.P., Schaefer C.E. (2026a) - PFAS conceptual site model of an AFFF-impacted firefighting training area informed by high resolution soil, porewater, and groundwater sampling. *Journal of Contaminant Hydrology* 276, 104728. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104728>.

Pritchard J.C., Hire M., McDonough J., Higgins C.P., Schaefer C.E. (2026b.) - PFAS conceptual site model of an AFFF-impacted firefighting training area informed by high resolution soil, porewater, and groundwater sampling. *Journal of Contaminant Hydrology* 276, 104728. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104728>.

RECORD (2024) - PFAS dans les sols en place et matériaux excavés Identification, quantification et valeurs de référence (No. ETUDE N° 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 alkylyyhdisteiden ympäristötutkimukset ja riskinarviointi. SYKE, Helsinki.

Rodowa A.E., Christie E., Sedlak J., Peaslee G.F., Bogdan D., DiGuseppi 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.

SCENARIOS (2023) - SCENARIOS - Innovative analytical methods for detection and monitoring of PFAS. D2.1 SOP for sample storage and handling.

Schellenberger S., Liagkouridis I., Awad R., Khan S., Plassmann M., Peters G., Benskin J.P., Cousins I.T. (2022) - An outdoor aging study to investigate the release of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from functional textiles. *Environmental Science & Technology* 56, 3471–3479.

SFSE (2023) - Évaluation 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.

Tokranov A.K., LeBlanc D.R., Pickard H.M., Ruyle B.J., Barber, L.B., Hull R.B., Sunderland E.M. Vecitis C.D. (2021) - Surface-water/groundwater boundaries affect seasonal PFAS concentrations and PFAA precursor transformations. *Environmental Science: Processes & Impacts* 23, 1893–1905.

UBA (2022) - Guidelines for PFAS assessment 56.

US EPA (2018) - Method 537.1: Determination of selected per- and polyfluorinated alkyl substances in drinking water by solid phase extraction and liquid chromatography/tandem mass spectrometry (LC/MS/MS) (EPA/600/R-18/352).

US EPA (2019) - Field Equipment Cleaning and Decontamination at the FEC. OPERATING PROCEDURE. (No. ASBPROC-206-R4).

US EPA (2020) - PFAS Master List of PFAS Substances (Version 2).

US EPA (2022) - Draft Method 1621. Screening Method for the Determination of Adsorbable Organic Fluorine (AOF) in Aqueous Matrices by Combustion Ion Chromatography (CIC). (No. EPA 821-D-22-002.). Environmental Protection Agency Office of Water (4303T)., Washington, D.C.: U.S.

US EPA (2022) - Draft Method 1633: Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aqueous, solid, biosolids, and tissue samples by LC-MS/MS.

US EPA (2025) - Field Equipment Cleaning and Decontamination (No. LSASDPROC-2025-R5).

Wanzek T., McIntyre H., Hawley, E., Deeb R., Bogdan D., Shaefer C., DiGuseppi B., Struse A., Schwichtenberg T., Field J. (2024) - Assessing Potential Bias in PFAS Concentrations in Groundwater and Surface Water Samples. *Groundwater Monitoring Rem* 44, 28–37. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12669>.

Waters corp. (2023) - Bonnes pratiques de suivi de la contamination par les PFAS dans un laboratoire multi-analyses. Livre blanc technique.

Whitehead H.D., Venier M., Wu Y., Eastman E., Urbanik S., Diamond M.L., Shalin A., Schwartz-Narbonne H., Bruton T.A., Blum A., Wang Z., Green M., Tighe M., Wilkinson J.T., McGuinness S., Peaslee G.F. (2021) - Fluorinated Compounds in North American Cosmetics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 538–544. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00240>.

Woudneh M.B., Chandramouli B., Hamilton C., Grace R. (2019) - Effect of Sample Storage on the Quantitative Determination of 29 PFAS: Observation of Analyte Interconversions during Storage. *Environ. Sci. Technol.* 53, 12576–12585. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03859>.

Xu C., Yang Y., Ling H., Yi C., Zhang X., Zhang R. (2025) - Occurrence and human exposure assessment of PFAS in river and groundwater around a closed fluorochemical plant in China. *Sci Rep* 15, 16241. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01128-6>.

Yang Y., Wang J., Tang S., Qiu J., Luo Y., Yang C., Lai X., Wang Q., Cao H. (2025) - Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Consumer Products: An Overview of the Occurrence, Migration, and Exposure Assessment. *Molecules* 30, 994. <https://doi.org/10.3390/molecules30050994>.

Zeng J., Brusseau M.L., Guo B. (2024) - Modeling PFAS Subsurface Transport in the Presence of Groundwater Table Fluctuations: The Impact on Source-Zone Leaching and Exploration of Model Simplifications. *Water Resources Research* 60, e2024WR037707. <https://doi.org/10.1029/2024WR037707>.

Zenobio J.E., Salawu, O.A., Han Z., Adeleye A.S. (2022) - Adsorption of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to containers. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7, 100130.

Zhang Y., Wang B., Ma S., Zhang Q. (2024) - Adsorption of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water with porous organic polymers. *Chemosphere* 346, 140600.

Zhou Y. (2023) - Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Personal Hygiene Products: The Implications for Human Exposure and Emission to the Environment | *Environmental Science & Technology*.

Zweigle J., Bugsel B., Röhler K., Haluska A.A., Zwiener C. (2023) - PFAS-Contaminated Soil Site in Germany: Nontarget Screening before and after Direct TOP Assay by Kendrick Mass Defect and FindPFAS. *Environ. Sci. Technol.* 57, 6647–6655. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07969>.



Centre scientifique et technique

Direction des Risques

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr