



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

État des lieux sur la méthodologie pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS dans les sols européens

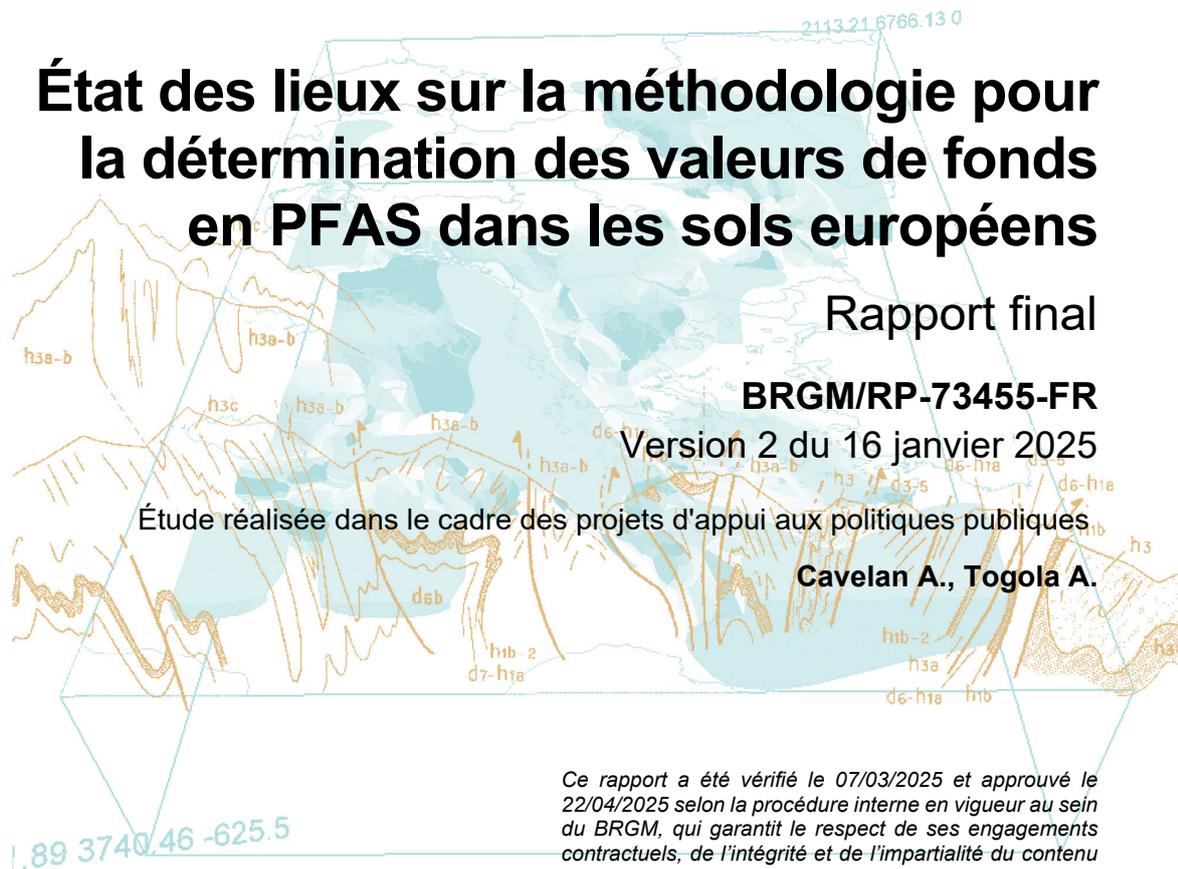
Rapport final

BRGM/RP-73455-FR

Version 2 du 16 janvier 2025

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

Cavelan A., Togola A.



Ce rapport a été vérifié le 07/03/2025 et approuvé le 22/04/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

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

Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : PFAS, Valeurs de fonds, Europe.

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

Cavelan A., Togola A. 2025. État des lieux sur la méthodologie pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS dans les sols européens. Rapport final V2. BRGM/RP-73455-FR, 41 p., 8 fig., 4 tab., 1 ann.

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

Synthèse

Le présent rapport réalisé par le BRGM pour le compte du Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche, bureau du Sol et du Sous-Sol (B3S) a pour objectif la réalisation d'un état des lieux des données et approches portant sur la détermination de valeurs de fonds en PFAS dans les sols américains et européens, afin d'alimenter les réflexions sur la définition du cadre méthodologique à appliquer sur le territoire français pour déterminer les valeurs de fonds en PFAS dans les sols.

Les PFAS regroupent plus de 12 000 composés de synthèse produits depuis les années 1930. Ces composés synthétisés par l'homme ne sont pas présents à l'état naturel. Dès la fin des années 1950, de nombreux objets industriels et du quotidien ont été fabriqués avec ou à partir de PFAS en raison de leurs propriétés physiques et chimiques : résistance à l'eau, aux huiles, stabilité thermique et chimique, propriétés de réduction de la friction. De nombreuses activités sont et ont été d'importantes sources d'émission de PFAS dans l'environnement, si bien qu'aujourd'hui ces substances sont retrouvées de manière ubiquiste dans les sols. En raison de l'ubiquité de ces substances, il est aujourd'hui nécessaire de déterminer des valeurs de fonds dans les sols afin de pouvoir identifier et délimiter les zones les plus concentrées.

À ce jour, seuls certains états des États-Unis d'Amérique (Maine, Vermont et Massachusetts) et quelques pays d'Europe (Belgique (Flandres), Pays-Bas, Suède, Finlande et Allemagne) ont déterminé les valeurs de fonds en PFAS de leurs sols (Figure 1).

Les stratégies d'établissement des valeurs de fonds diffèrent entre ces pays. Les sols échantillonnés peuvent être les plus naturels possibles, loin de toutes sources directes d'émission en PFAS et de toutes activités humaines pour obtenir des valeurs de fonds les plus basses possibles (ex : Suède). L'objectif est alors de pouvoir quantifier et délimiter même de très faibles niveaux de pollution. Tous les types de sols (urbains, naturels, forestiers, agricoles) sont parfois indifféremment échantillonnés sans distinction. L'objectif est alors d'obtenir une valeur de fonds d'ensemble prenant en compte la diversité des usages des sols du territoire (ex : les Flandres). Enfin, d'autres pays distinguent les sols urbains et non urbains pour obtenir des valeurs de fonds pour différents types d'usage du sol (ex : Pays-Bas, Finlande).

La liste des substances analysées pour lever ces valeurs de fonds varie d'un pays à l'autre. Si chacun des pays cible les substances supposées associées aux sources d'émission identifiées sur les différents territoires, la liste des substances retenues évolue en fonction des connaissances, des moyens analytiques disponibles dans les laboratoires et des coûts d'analyse (de 18 à 39 substances). La méthode de calcul des valeurs de fonds est également variable d'un pays à l'autre (90^e, 95^e percentiles etc.). Malgré ces différences méthodologiques, les données montrent que les teneurs en PFAS total ainsi mesurées dans les sols sont globalement comparables (de < 0,3 à 10 µg/kg dans les sols urbains et de < 0,03 à 6 µg/kg en moyenne dans les sols non urbains. Ce qui induit des valeurs de fonds retenues en Europe et aux États-Unis, globalement comprises entre 0,3 et 11 µg/kg pour les sols urbains et entre 0,3 à 4 µg/kg pour les sols non urbains.

Ainsi et conformément à ses propres guides méthodologiques, le BRGM recommande d'adapter les stratégies d'échantillonnage et d'analyse des sols et de détermination des valeurs de fonds dans les sols français à l'objectif fixé ; détermination des valeurs de fonds des sols naturels (sols en dehors de toutes pressions anthropiques directes), des sols urbains et agricoles anthropisés (sols soumis à une pression anthropique directe).

Si, en l'état, les réseaux d'échantillonnage existant à l'échelle nationale ne peuvent répondre à l'intégralité des questions posées (ne prenant pas en compte les sols urbains), l'échantillonnage pour la collecte des données pourrait s'appuyer en partie sur ces réseaux (ex : réseau RMQS avec 2 240 sites d'échantillonnage répartis uniformément sur le territoire français selon une grille de maille carrée de 16 km de côté). L'action 4 (sous-action 8¹) du plan interministériel PFAS, pilotée par la DGPR, l'ADEME et le GIS Sol, prévoit justement l'inclusion du suivi des PFAS dans la prochaine campagne d'échantillonnage de sols du RMQS ([Plan PFAS 2024](#)). En complément, un échantillonnage intégrant des sols en milieux urbains ou péri-urbains permettrait de déterminer des valeurs de fonds en PFAS correspondant plus à la notion de fonds pédo-géochimique anthropisé urbain utilisée en SSP. Un versement de ces résultats dans la base de données BdSolU pourrait permettre de capitaliser les données relatives à ces prélèvements et leurs analyses et de proposer des valeurs de fonds en PFAS dans les sols urbains. Il reste également à définir la stratégie de monitoring à mettre en œuvre dans les sols à prélever (quelles substances, quel protocole d'échantillonnage et d'analyses, quelles performances analytiques ?). Cette action s'annonce délicate en raison du manque d'information sur la nature et les propriétés des différentes substances poly et perfluorées émises par les différents secteurs d'activité présents sur le territoire.

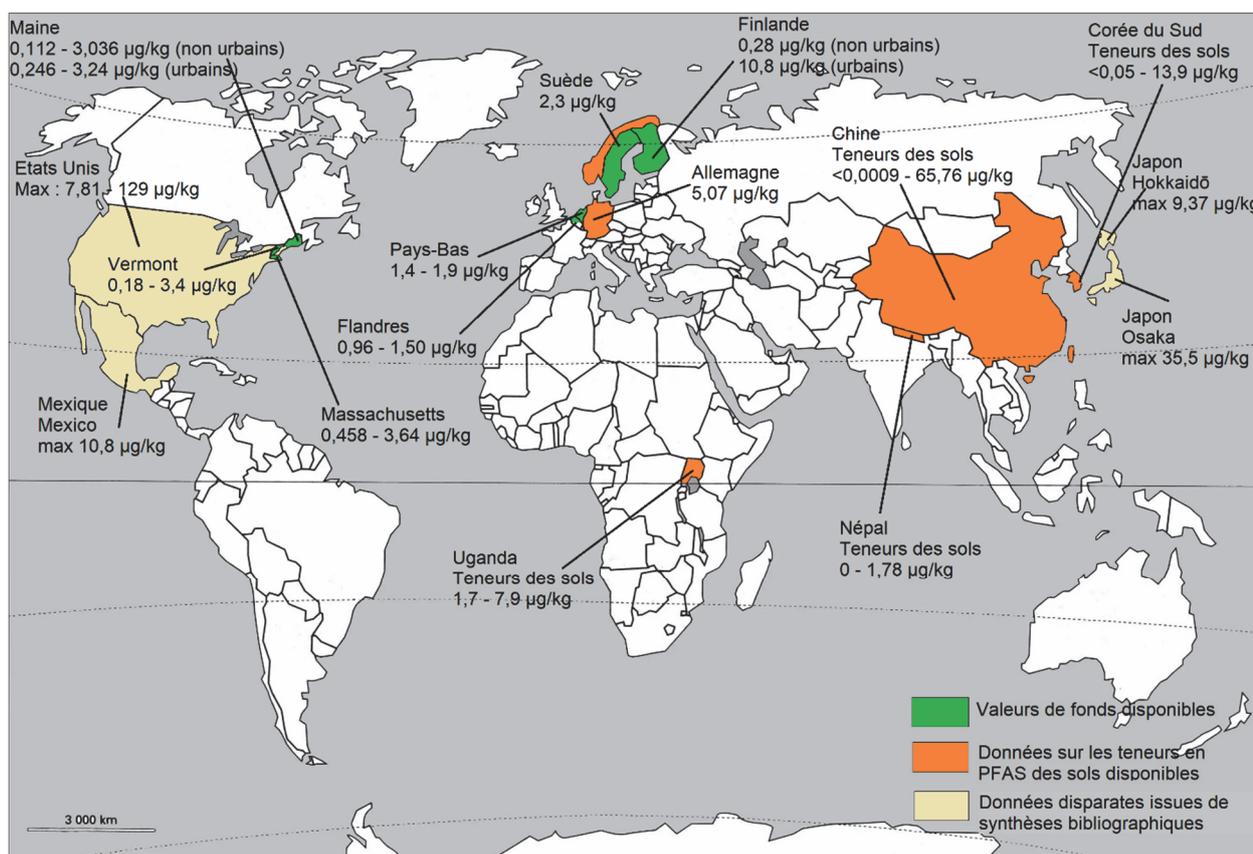


Figure 1 : Synthèse des données actuellement disponibles concernant les concentrations totales en PFAS dans les sols. En vert, les pays pour lesquels des valeurs de fonds dans les sols en PFAS sont disponibles. En orange, les pays pour lesquels des concentrations en PFAS sont disponibles mais les valeurs de fonds sont indisponibles ou en cours de détermination. En jaune, les pays pour lesquels seules des teneurs maximales en PFAS dans les sols de plusieurs villes sont communiquées.

¹ Action 4 - Sous-action 8 - « Renforcer la surveillance des PFAS dans les sols »

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Contexte | 11 |
| 2. Travaux mis en œuvre pour la détermination de valeurs de fonds dans les sols des pays européens et américains | 13 |
| 2.1. EN SUÈDE | 15 |
| 2.1.1. Contexte et objectifs des travaux | 15 |
| 2.1.2. Méthodologie | 15 |
| 2.1.3. Résultats | 16 |
| 2.2. LES PAYS-BAS | 17 |
| 2.2.1. Contexte et objectifs des travaux | 17 |
| 2.2.2. Méthodologie | 17 |
| 2.2.3. Résultats | 18 |
| 2.3. EN FINLANDE | 19 |
| 2.3.1. Contexte et objectif | 19 |
| 2.3.2. Méthodologie | 19 |
| 2.3.3. Résultats | 19 |
| 2.4. LES FLANDRES | 21 |
| 2.4.1. Contexte et objectifs | 21 |
| 2.4.2. Méthodologie | 21 |
| 2.4.3. Résultats | 21 |
| 2.5. L'ALLEMAGNE | 22 |
| 2.5.1. Contexte et objectifs | 22 |
| 2.5.2. Méthodologie | 22 |
| 2.5.3. Résultats | 22 |
| 2.6. D'AUTRES EXEMPLES HORS EUROPE | 23 |
| 2.6.1. États-Unis d'Amérique | 23 |
| 2.6.2. D'autres exemples à travers le monde | 25 |
| 2.7. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES | 27 |
| 3. Quelle méthodologie développer en France ? | 29 |
| 3.1. QUE SIGNIFIE LE TERME VALEURS DE FONDS EN FRANCE ? | 29 |
| 3.2. QUELLES SONT LES MÉTHODOLOGIES EXISTANTES POUR DÉTERMINER DES VALEURS DE FONDS EN FRANCE ? | 31 |
| 3.3. QUEL RÉSEAU D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA COLLECTE DES DONNÉES ? | 32 |
| 3.4. QUELS INDICATEURS MESURER ? | 33 |
| 4. Conclusions | 35 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Synthèse des données actuellement disponibles concernant les concentrations totales en PFAS dans les sols. En vert, les pays pour lesquels des valeurs de fonds dans les sols en PFAS sont disponibles. En orange, les pays pour lesquels des concentrations en PFAS sont disponibles mais les valeurs de fonds sont indisponibles ou en cours de détermination. En jaune, les pays pour lesquels seules des teneurs maximales en PFAS dans les sols de plusieurs villes sont communiquées..... | 4 |
| Figure 2 : Répartition du réseau d'échantillonnage pour la levée des valeurs de fonds et teneurs en PFAS dans les sols Suédois. A) Campagne de 2017-2018 (Kikuchi <i>et al.</i> , 2018), B) Campagne de 2018-2022 (Söregård <i>et al.</i> , 2022)..... | 16 |
| Figure 3 : Répartition du réseau d'échantillonnage pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS dans les sols Néerlandais (Wintersen <i>et al.</i> , 2020; Wintersen and Otte, 2020). En rouge les sols potentiellement affectés par des sources d'émission en PFAS, en bleu les sols affectés par aucune source d'émission en PFAS connue. | 18 |
| Figure 4 : Localisation des points d'échantillonnage et teneurs en PFAS des sols sur le territoire finlandais (Reinikainen <i>et al.</i> , 2024)..... | 20 |
| Figure 5 : Implantation du réseau d'échantillonnage pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS des sols du Maine (USA), (d'après Roakes and Zemba, 2022). | 24 |
| Figure 6 : Termes liés aux valeurs de fonds (Guide pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols, ADEME 2018). | 29 |
| Figure 7 : Exemple de stratégies d'échantillonnage (d'après ADEME, 2018). | 31 |
| Figure 8 : Implantation du réseau RMQS (d'après Jolivet <i>et al.</i> , INRAE 2018). | 33 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Valeurs de fonds et valeurs guides ($\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec) pour les PFAS dans les sols européens et américains..... | 14 |
| Tableau 2 : Synthèse des autres travaux portant sur la détermination de teneurs en ΣPFAS dans des sols. | 26 |
| Tableau 3 : Synthèse des substances quantifiées (gris foncé), recherchées mais non quantifiables (teneurs < LQ) (en gris clair), ou non recherchées (en blanc) pour chaque étude visant à lever des valeurs de fonds en PFAS des sols. Les valeurs représentent la concentration moyenne de la substance en $\mu\text{g}/\text{kg}$ mesurée dans les sols si disponibles..... | 28 |
| Tableau 4 : Exemple de types de valeurs de fonds en PFAS ayant été déterminées pour les sols et leurs applications possibles. | 30 |

Liste des annexes

| | |
|---|----|
| Annexe 1 : Liste des PFAS considérés dans ce rapport..... | 41 |
|---|----|

Abréviations

Acronymes :

- DEP :** Département de la protection de l'environnement de l'état du Maine
- EFSA :** Autorité européenne de sécurité des aliments
- EGC :** Entités Géographiques Cohérentes
- EPA :** Agence de la Protection Environnementale des États-Unis d'Amérique.
- GTK :** Service Géologique de Finlande
- HAP :** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
- ICPE :** Installations classées pour la protection de l'environnement
- OVAM :** L'agence publique flamande des déchets
- PFAS :** Substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées
- RIVM :** L'Institut National pour la santé publique et l'environnement néerlandais
- RMQS :** Réseau de Mesures de la Qualité des Sols
- SGI :** L'Institut géotechnique suédois
- SLU :** Département des sciences aquatiques et de l'évaluation, Université des sciences de l'agriculture suédois
- SSTP :** Valeur de fond recommandée la plus élevée en Finlande (correspond à la ligne de base en France).
- SYKE :** Centre finlandais pour l'environnement
- VTDEC :** Département de la conservation de l'environnement du Vermont
- TOP :** Total des Précurseurs Oxydables

Substances :

- EtPFOSA :** N-éthyl heptadécafluorooctane sulfonamide
- EtFOSAA :** Acide n-éthyl perfluorooctane sulfonamide acétique
- EtFOSE :** N-Ethyl-N-(2-hydroxyéthyl) perfluorooctyl sulfonamide
- FASE :** Perfluoroalcanes sulfonamides éthanol
- PFASA :** Perfluoroalcanes sulfonamides
- FASAA :** Acides perfluoroalcanes sulfonamides acétiques
- FOSAA :** Acide perfluorooctane sulfonamide acétique
- FOSE :** Perfluorooctane sulfonamide éthanol
- FTS :** Fluorotélomères sulfonates
- HFPO-DA (Gen-X) :** Acide dimère d'oxyde d'hexafluoropropylène

| | |
|----------------|---|
| MePFOSA | : Méthyl perfluorooctane sulfonamide |
| MeFOSAA | : Acide n-méthyl perfluorooctane sulfonamide acétique |
| MeFOSE | : N-méthyl perfluorooctane sulfonamide éthanol |
| PFBA | : Acide perfluorobutanoïque |
| PFBS | : Acide perfluorobutane sulfonique |
| PFCA | : Acides carboxyliques perfluorés |
| PFDA | : Acide perfluorodécanoïque |
| PFDoDA | : Acide perfluorododécanoïque |
| PFDS | : Acide perfluorodécane sulfonique |
| PFHpA | : Acide perfluoroheptanoïque |
| PFHxA | : Acide perfluorohéxanoïque |
| PFHxS | : Acide perfluorohexane sulfonique |
| PFNA | : Acide perfluorononanoïque |
| PFOA | : Acide perfluorooctanoïque |
| PFOcDA | : Acide perfluorooctadécanoïque |
| PFOS | : Acide perfluorooctane sulfonique |
| PFOSA | : Perfluorooctane sulfonamide |
| PFPeA | : Acide perfluoropentanoïque |
| PFSA | : Acides sulfoniques perfluorés |
| PFTeDA | : Acide perfluorotétradécanoïque |
| PFTriDA | : Acide perfluorotridécanoïque |
| PFUnDA | : Acide perfluoroundécanoïque |

Préambule

Lors de la détermination des valeurs de fonds dans les autres pays d'Europe, le terme « valeurs de fonds » n'est que très rarement défini. En France, selon la méthodologie nationale, il désigne une valeur ou plusieurs valeurs caractéristiques statistiques (médiane, moyenne, écart-type, percentile) de la population des concentrations de fond d'une substance (c'est à dire de la gamme des concentrations habituelles de la substance) dans un milieu donné (Norme NF EN ISO 19258 : 2018 Qualité du sol - Recommandations pour la détermination des valeurs de fonds). Ici, c'est la gamme des concentrations en substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) des sols qui sera considérée.

Différentes méthodes existent pour délimiter les concentrations de fond dans les sols mais elles ne sont pas toujours satisfaisantes ni homogènes d'un pays à l'autre. Dans les études présentées dans ce rapport, la détermination des valeurs de fonds des sols en PFAS repose surtout sur la distinction entre sols urbains et sols dits « naturels ».

Or, dans certaines études, l'expression « sols naturels » apporte une ambiguïté car elle inclut les sols agricoles. Toutefois, les sols agricoles sont soumis à des pressions anthropiques directes, pouvant impacter leur teneur en PFAS (par exemple les épandages de boues), et sont donc plus généralement rattachés aux sols anthropisés au même titre que les sols urbains, les pâturages, les chemins, les sentiers, ou les sols de forêts cultivées. On pourrait alors parler pour ces usages de valeurs de fonds de sols anthropisés ou fortement anthropisés.

Par opposition, les sols « naturels » désignent plus généralement les sols en dehors de toutes pressions anthropiques directes. Cependant, certaines de ces substances sont capables d'être transportées dans l'atmosphère sur de très longues distances et d'atteindre des sols naturels éloignés de toutes activités humaines. Ainsi, les valeurs de fonds des sols naturels ne correspondent donc pas rigoureusement à un fond pédogéochimique naturel (lequel devrait être dépourvu de PFAS puisque ces substances sont uniquement synthétisées par l'Homme), mais plutôt à des valeurs de fonds de sols peu ou faiblement anthropisés.

Un travail de recherche doit donc encore être mené pour définir et uniformiser les typologies des différents fonds en fonction des usages des sols.

Dans ce rapport, les termes utilisés sont ceux issus des études présentées et seront systématiquement définis pour éviter toutes ambiguïtés.

1. Contexte

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) regrouperaient plus de 12 000 composés de synthèse produits, pour certains, depuis les années 1930. Les PFAS ont été largement produits et utilisés par l'industrie dans différents secteurs (mousses anti-incendie, textile, papier et carton, peinture, phytopharmacie, électronique, métallurgie, hydraulique, produits cosmétiques) en raison de leurs propriétés chimiques particulières (résistance à l'eau, aux huiles, stabilité thermique et chimique, propriétés de réduction de la friction, isolant, etc.). La synthèse de ces substances, leur utilisation dans ces différents secteurs pour la production de biens de consommations divers, l'usure ou la dégradation de ces produits une fois usagés ont conduit à l'émissions de PFAS dans l'environnement.

Les études disponibles montrent que la présence des PFAS dans l'environnement est désormais ubiquiste (présents dans l'air, l'eau et les sols ainsi que les êtres vivants). C'est pourquoi, conformément à méthodologie des sites et sols pollués, il est nécessaire de discriminer les occurrences de PFAS relevant d'un fonds diffus (gamme des concentrations habituelles d'une substance dans le milieu considéré) de celles des sources ponctuelles de pollution.

Les évolutions réglementaires en cours et l'attention médiatique sur les PFAS depuis 2023 ont conduit à l'accentuation de la recherche des PFAS au droit des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Ainsi, les inspecteurs sont amenés à donner des préconisations aux exploitants pour la prise en charge et la maîtrise de ces émissions. En parallèle, de nombreuses études sont en cours sur les PFAS, ce qui permet de gagner en compréhension sur leurs origines et leur présence dans les milieux. Cependant, cette effervescence scientifique génère une affluence d'informations nouvelles nécessitant d'être synthétisées, interprétées, contextualisées et/ou portées à connaissance des décideurs et du public.

Dans ce contexte, et sur la base des travaux en cours, l'objectif de la présente étude est de faire un état des lieux et une analyse critique des teneurs en PFAS observées dans les sols en dehors des pollutions localisées à l'échelle des sites (valeurs de fonds) en Europe, en étudiant les méthodologies mises en œuvre pour ces déterminations. Il s'agit de regrouper les éléments disponibles et d'entamer les échanges avec les acteurs concernés pour permettre la définition d'un cadre méthodologique à appliquer en France.

Avertissement

Ce travail est une synthèse bibliographique des études disponibles au moment de la rédaction de ce rapport sur les sols visant à accompagner la réflexion autour de la mise en place d'une méthodologie pour déterminer les valeurs de fonds en PFAS dans les sols français. La liste des substances étudiées dans ce rapport ne préfigure donc en aucun cas une liste réglementaire de substances à surveiller dans les sols.

2. Travaux mis en œuvre pour la détermination de valeurs de fonds dans les sols des pays européens et américains

Ce premier paragraphe est un état de l'art concernant la détermination de valeurs de fonds en PFAS dans les sols européens et américains. La production d'informations sur les PFAS étant très dynamique, seules les informations disponibles avant le 30 avril 2023 ont été prises en considération dans ce travail. Plusieurs rapports, publications et bases de données renseignent sur les teneurs en PFAS dans les sols en Europe. La majorité provient des Pays-Bas, des Flandres, de la Suède et de la Finlande. Parmi les PFAS ciblés, le PFOS et le PFOA sont les substances les plus fréquemment analysées, mais la liste est souvent étendue à une quarantaine de substances. La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs de fonds et valeurs guides ($\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec) pour les PFAS dans les sols européens et américains.

| | Etats Unis | | | | | Massachusetts |
|---|--|--|---|--|--|--|
| | Europe | Finlande | Flandres | Allemagne | Pays-Bas | |
| PFAS quantifiés | 28 | 37 | 39 | 24 | 29 | 18 |
| Usages des sols ciblés | Naturels | Naturels/urbains | Naturels/agricoles | Naturels/agricoles/urbains/industriels | Sols urbains/ non urbains | Urbains/non urbains |
| No. d'échantillons | 58 | 150 | 125 | 55 | 300 | 68 |
| No. d'échantillons /100 km² | 0,01 | 0,04 | 1 | > 0,01 | 0,71 | 0,27 |
| Teneurs en PFAS | $\Sigma_{\text{PFAS}} : 0,40-6,6$ | $\Sigma 4_{\text{PFAS}} : <0,03-3,5$ (sols naturels) et $<0,03-110$ (sols urbains) | [PFOS] moyen : 0,78; [PFOA] moyen : 0,56; [PFBA] moyen : 0,76 | [PFOS] moyen : 2,74 [PFOA] moyen : 1,00 $\Sigma_{\text{PFAS med}} : 0,31 - 19,7$ | [PFOS] : <0,4-2,4 (sols non urbains); [PFOA] : <0,5-7,4 (sols urbains) et <0,5-3,9 (sols non urbains) | <0,03 à 9,7 par composé |
| Valeur de fonds | $\Sigma_{\text{PFAS}} : 2,3 \pm 1,3$ | $\Sigma 4_{\text{PFAS}} : 0,28$ (sols naturels), 10,8 (sols urbains) | [PFOS] : 1,50; [PFOA] : 0,96; [PFBA] : 1,25 | $\Sigma_{\text{PFAS moy}} : 5,07$ | [PFOS] : 3,036; [PFOA] : 2,18; [PFNA] : 1,93; [PFDA] : 3,24 (urbains) et 0,112 (non urbains); [PFUNDA] : 0,944; [PFBA] : 0,431; [PFPeA] : 1,02; [PFHxA] : 1,49; [PFHpA] : 0,246. | <0,03 à 6,0 par composé |
| Valeurs guides | [PFOS] : 3 (usage sensible), 20 (autre usage) | [PFOS] : 3,8 (sols naturels/agriculture), 4,9 (résidentiel), 110 (récréatif), 268 (industriel) | [PFOA] : 2,5 (naturel/agricole), 7,9 (résidentiel), 632 (récréatif), 303 (industriel) | [PFOA] : 86 (agricole), 1100 (résidentiel), 37000 (industriel) | [PFOS] : 120 (résidentiel), 1400 (commercial), 5100 (construction), 0,0052 (usage bénéficiaire) | [PFOS] : 3,64; [PFOA] : 2,15; [PFNA] : 0,698; [PFDA] : 0,458; [PFHxA] : 1,04; [PFHpA] : 1,44; [PFOS] : 2,0 (sensible); [PFOA] : 0,72 (sensible), 400 (non sensible); [PFNA] : 0,32 (sensible), 400 (non sensible); [PFHxA] : 0,5 (sensible), 400 (non sensible); [PFDA] : 0,30 (sensible), 400 (non sensible). |
| Références | Johansson, 2023; Kikuchi et al., 2018; Sörensgård et al., 2022 | Reinikainen and Tarvainen, 2023 | OVAM, 2018; Rabaey and Pancras, 2018; Touchant and Van Holderbeke, 2020; Van Gestel, 2023 | Wellnitz et al., 2023 | Wintersen et al., RIVM 2020; Wintersen and Otte, RIVM 2020 | Healey et al., Woodard and Curran 2023; McIntosh et al., 202 |

Σ_{PFAS} : somme des PFAS quantifiés, incluant, selon les travaux de 18 à 39 PFAS. Sols naturels : sols en dehors de toutes pressions anthropiques directes.

2.1. EN SUÈDE

2.1.1. Contexte et objectifs des travaux

En Suède, des valeurs guides génériques en PFAS existent déjà pour l'évaluation des risques pour l'environnement et la santé des sols mais uniquement pour le PFOS et la somme du PFOA, PFOS, PFNA, et PFHxS (4 PFAS). Ces valeurs sont déterminées par étude générique des risques sanitaires et déclinées selon l'usage du sol et concernent un usage sensible (ex : le logement) et un usage moins sensible (ex : l'industrie) des sols (Tableau 1, Johansson, 2023). La détermination de ces valeurs guides repose sur « la dose de consommation tolérable » déterminée par l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) qui se base sur les risques que le site pollué peut présenter pour les personnes et l'environnement dans la limite du site et en aval de la zone considérée.

Selon l'Institut Géotechnique Suédois (SGI), les données permettant d'élaborer des valeurs indicatives pour d'autres PFAS étaient insuffisantes voire inexistantes. Aussi, depuis 2018, l'Agence suédoise pour la protection de l'environnement (la Naturvårdsverket) finance des travaux visant à déterminer la répartition spatiale et les valeurs de fonds en PFAS sur le territoire Suédois. Ces valeurs doivent servir à la détermination de lignes de base pour améliorer les efforts visant à délimiter des pollutions en PFAS et améliorer l'évaluation de la qualité des sols. Ces valeurs de fonds pourraient également servir de cadre à la révision des valeurs guides génériques en place. Les travaux menés en collaboration avec la SGI et le département des sciences aquatiques et de l'évaluation de l'Université des sciences de l'agriculture suédois (SLU) ont abouti à un rapport et deux publications en 2022 (Kikuchi *et al.*, 2018; Sörengård *et al.*, 2022) mais d'autres investigations sont en cours.

2.1.2. Méthodologie

Pour les travaux menés de 2018 à 2022, 27 échantillons ont été récoltés à travers la Suède (Sörengård *et al.*, 2022). En supplément, 31 autres échantillons de sol ont été prélevés, au hasard, parmi l'inventaire des sols forestiers suédois de 2017 (Kikuchi *et al.*, 2018 ; Nilsson *et al.*, 2017). Soit, un total de 58 échantillons pour couvrir une surface de 528 447 km². En Suède, des inventaires des sols et terres arables sont effectués tous les deux ans depuis les années 1990. Les forêts font également l'objet d'un inventaire depuis 1983. Ce sont donc en partie sur ces inventaires nationaux, que reposent les campagnes mises en place pour les valeurs de fonds en PFAS.

L'échantillonnage a été réalisé selon un transect nord-sud et est-ouest pour tenir compte de potentiels gradients latitudinaux et longitudinaux en PFAS à l'échelle du pays (Figure 2). L'échantillonnage s'est concentré sur les sols des forêts non impactés par l'Homme et donc sans impact local connu de pollution au PFAS car c'est le type de sol dominant en Suède. Chaque échantillon récolté est un échantillon composite de 5 sous-échantillons pris dans une surface de 1 m² dans les 10 cm supérieurs de l'horizon organique du sol. Pour ces travaux, 28 PFAS ont été ciblés : 13 PFCAs (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA, PFDoDA, PFTriDA, PFTeDA et PFOcDA, PFUnDA, PFDoDA), 4 PFASs (PFBS, PFHxS, PFOS et PFDS), 3 PFASAs (PFOSA, MePFOSA et EtPFOSA), 2 FASEs (MeFOSE et EtFOSE), 3 FASAAs (FOSAA, MeFOSAA, et EtFOSAA), et 3 FTSs (6:2 FTS, 8:2 FTS, et 10:2 FTS).

2.1.3. Résultats

Les résultats de ces deux campagnes montrent que seulement 16 des 28 PFAS ciblés ont été analysés à des concentrations supérieures à la limite de quantification dans au moins un des échantillons de sols suédois (PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTriDA, PFTeDA, PFHxDA, PFBS, PFHxS, PFOS, 6 :2 FTS, PFOSA, et le FOSAA). Des concentrations de $\sum_{28\text{-PFAS}}$ (somme des 28 PFAS quantifiés) comprises entre 0,40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et 8,7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec ont été obtenues pour une valeur de fonds médiane en $\sum_{28\text{-PFAS}}$ de 1,9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec pour la première campagne. Lors de la seconde campagne (Figure 2), les concentrations étaient comprises entre 0,40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et 6,6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec pour une valeur de fonds médiane en $\sum_{28\text{-PFAS}}$ de $2,3 \pm 1,3$ $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec. Le PFOS représente à lui seul environ 20 % du $\sum_{28\text{-PFAS}}$. Les limites de quantification pour chaque substance étaient comprises entre 0,0049 et 8,78 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (la limite propre à chaque substance n'est pas communiquée).

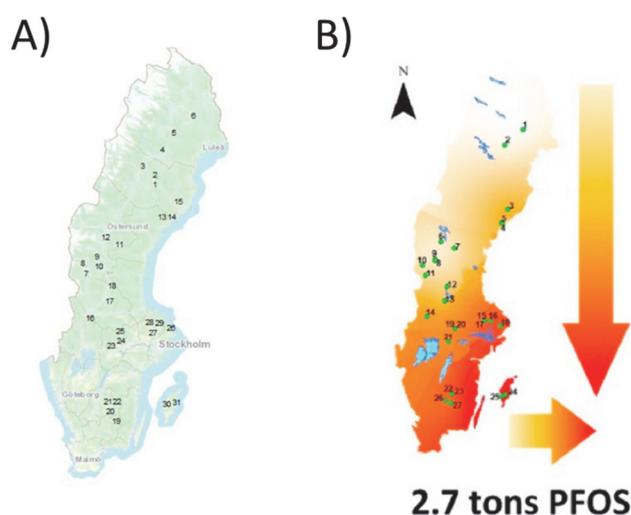


Figure 2 : Répartition du réseau d'échantillonnage pour la levée des valeurs de fonds et teneurs en PFAS dans les sols Suédois.
 A) Campagne de 2017-2018 (Kikuchi et al., 2018),
 B) Campagne de 2018-2022 (Söregård et al., 2022).

Ces travaux révèlent que la valeur guide établie par le SGI pour le PFOS dans les sols pour une utilisation sensible des sols (3 $\mu\text{g}/\text{kg}$) n'est dépassée dans aucun échantillon. Cependant, en supposant la même toxicité pour tous les PFAS, les concentrations totales en PFAS des sols ont dépassé la valeur guide dans 26 % des cas. Ces travaux montrent également que la concentration de PFAS totale mesurée dans les sols est généralement quatre fois plus élevée que la concentration du PFOS seule, soulignant l'importance d'inclure un plus large spectre de PFAS à la liste des substances à suivre et ne pas se contenter uniquement du PFOS et du PFOA.

2.2. LES PAYS-BAS

2.2.1. Contexte et objectifs des travaux

Aux Pays-Bas, l'Institut National pour la santé publique et l'environnement (RIVM) a déterminé des valeurs guides temporaires pour le PFOS et le PFOA dans les sols néerlandais (Tableau 1). Ces valeurs ont été déterminées d'après des calculs de risques sanitaires. L'usage des sols et le facteur de toxicité de la substance sont pris en compte pour calculer la valeur guide de chaque PFAS dans les sols. Les toxicités des substances sont évaluées par rapport au PFOA en attendant des valeurs indicatives pour chaque PFAS (Wintersen *et al.*, 2020; Wintersen and Otte, 2020). Des valeurs guides pour la réutilisation des sols y sont également intégrées, mais ces données ne prennent pas en compte le risque d'exposition à ces substances, seulement la préservation de la qualité des sols. Afin d'obtenir des données permettant de mieux délimiter les pollutions des sols en PFAS et de vérifier la compatibilité des valeurs guides proposées et l'état actuel des sols néerlandais, des mesures dans les sols ont été réalisées sur une centaine de sites sélectionnés aux Pays-Bas pour déterminer les valeurs de fonds en PFAS des sols en 2019.

2.2.2. Méthodologie

La stratégie mise en place par les Pays-Bas a consisté à prélever 300 échantillons de sols pour couvrir les 41 850 km² du territoire :

- 100 échantillons ont été prélevés dans des sols présentant différents types d'occupation à travers le pays en dehors de sources de pollutions connues (prairies, forêts, et parcelles agricoles) ;
- 100 échantillons ont été prélevés dans des sols urbains où des sources de pollution diffuses sont potentiellement présentes (ex : sols dans un rayon de moins de 50 km de l'usine Chemours de Dordrecht qui produit du Téflon[®], Figure 3) ;
- 100 échantillons supplémentaires ont été prélevés dans des sols dont le type n'a pas été précisé pour la recherche de quelques indicateurs spécifiques tels que la présence de HPFO-DA et la mesure du TOP (total des précurseurs oxydables)².

Les sols ont été prélevés à deux profondeurs : de 0-20 cm et de 50-100 cm (Wintersen *et al.*, 2020).

Au total, 30 PFAS ont été recherchés dans les sols néerlandais dont 7 PFASAs (PFBS, PFDS, PFHpS, PFHxS, PFPeS, PFOS linéaire et branché), 13 PFCAs (PFBA, PFDA, PFDoDA, PFHpA, PFHxA, PFNA, PFOA linéaire et branché, PFPeA, PFOcDA, PFHxDA, PFUnDA, PFTeDA), 2 PFASAs (MePFOSA, PFOSA), 2 FASAAs (EtFOSAA, MeFBSAA), le 8:2 diPAP, 4 FTSs (4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS 10:2 FTS), complétés par le HPFO-DA.

² Dosage par LC/MS/MS après oxydation chimique de l'échantillon, permettant de transformer les PFAS précurseurs (ex : sulfonamides, fluorotélomères) en PFCAs.

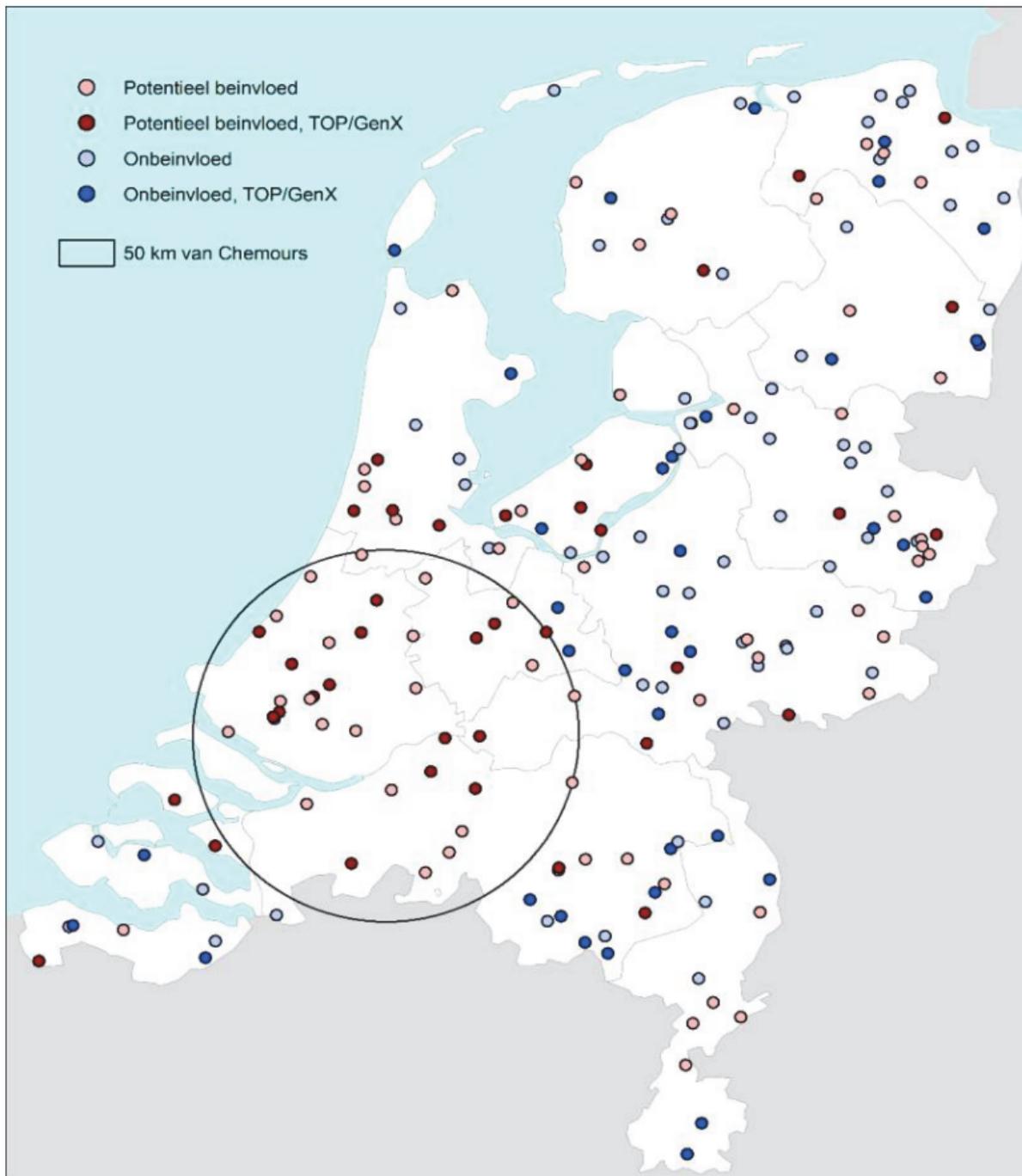


Figure 3 : Répartition du réseau d'échantillonnage pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS dans les sols Néerlandais (Wintersen et al., 2020; Wintersen and Otte, 2020). En rouge les sols potentiellement affectés par des sources d'émission en PFAS, en bleu les sols affectés par aucune source d'émission en PFAS connue.

2.2.3. Résultats

Les résultats montrent que seuls le PFOA et le PFOS sont quantifiés sur l'ensemble des sols échantillonnés. Les teneurs en PFOS dans les sols varient de <0,4 (limite de quantification (LQ)) à 2,4 µg/kg dans les sols « naturels » (définis ici comme des sols non urbains) et de <0,4 à 5,0 µg/kg dans les sols potentiellement affectés par des pollutions diffuses (sols urbains).

Cela correspond à une valeur de fonds de 1,4 µg/kg de sol pour le PFOS. Pour le PFOA, les teneurs dans les sols varient de <0,5 (LQ) à 3,9 µg/kg dans les sols « naturels » et de <0,5 à 7,4 µg/kg dans les sols potentiellement impactés par des pollutions diffuses (Wintersen *et al.*, 2020). Cela correspond à une valeur de fonds de 1,9 µg/kg de sol pour le PFOA (Tableau 1). Ces données montrent une diminution de la teneur en PFAS avec l'augmentation de la profondeur des prélèvements de sol. Les teneurs des sols pour les autres PFAS n'ont pas été communiquées (souvent en dessous de la LQ), le PFOS et le PFOA étant considérés comme les deux PFAS majoritaires. Les concentrations en PFOS et PFOA des sols échantillonnés sont inférieures aux valeurs guides actuellement en place (Tableau 1).

2.3. EN FINLANDE

2.3.1. Contexte et objectif

Depuis 2022, le Ministère de l'Environnement finlandais a financé une étude menée par le service géologique de Finlande (GTK) et le Centre finlandais pour l'environnement (SYKE) pour déterminer les valeurs de fonds des sols finlandais (Reinikainen *et al.*, 2024; Reinikainen and Tarvainen, 2023). Cette étude visait à définir la fourchette supérieure des concentrations de fonds habituelles en PFAS des sols, c'est-à-dire les valeurs de fonds recommandées les plus élevées (SSTP). Comme dans les autres pays, ces données doivent servir à une meilleure détermination de l'état des sols et une meilleure délimitation des pollutions en PFAS liées à une source industrielle. La restitution de l'ensemble des résultats a été publiée début 2024 (Reinikainen *et al.*, 2024). Ces données doivent alimenter TAPIR, une base de données qui regroupe l'ensemble des valeurs de fonds régionales finlandaises calculées (pour la plupart) pour les concentrations d'éléments dans différents types de sol. Le calcul de ces valeurs de fonds repose sur la norme internationale ISO 19258:2018.

2.3.2. Méthodologie

Pour cette campagne, 150 échantillons ont été prélevés sur l'ensemble du territoire finlandais pour une surface de 338 462 km². Afin de couvrir différents types de sols, 98 échantillons ont été prélevés dans des sols de surface naturels (0-25 cm) de type moraines et tills (abondants en Finlande et éloignés de toutes activités humaines) et 52 dans des sols de surface urbains (0-10 cm, Figure 4). Pour les sols urbains, des transects ont été réalisés depuis les bordures limitrophes de la ville jusqu'au centre de trois villes (Turku au sud-ouest, Lappeenranta au sud-est et Oulu au centre-est) afin d'évaluer l'apport des sols les plus fortement anthropisées à ces valeurs de fonds (Reinikainen *et al.*, 2024; Reinikainen and Tarvainen, 2023).

Une liste de 37 PFAS a été analysée : 10 PFASs (PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFDS, PFPeS, PFNS, PFDoS, PFUnDS, PFTrDS), 14 PFCAs (PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTeDA, HPFHpA, PFBA, PFPeA, PFHxDA, PFTrDA, PFOcDA), 3 PFASAs (PFOSA, MePFOSA ; EtPFOSA), 2 FOSEs (MeFOSE, EtFOSE), 3 FOSAAs (MeFOSAA, EtFOSAA, FOSAA), le PF-3,7-DMOA, et 4 FTSs (4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 10:2 FTS).

2.3.3. Résultats

Les résultats préliminaires de cette campagne montrent que les concentrations en PFAS dans les sols finlandais naturels sont inférieures à la LQ dans 37 % des cas. Les limites de quantification varient de <0,03 (LQ la plus basse) à 1 µg/kg selon les substances. Seule la valeur de fonds recommandée la plus élevée (SSTP) pour la somme de 4 PFAS (PFOS, PFOA, PFHxS, PFNA) a pu être calculée. Les teneurs pour $\sum_4 \text{PFAS}$ varient de <0,03 à 3,5 µg/kg pour les sols naturels ($\sum_4 \text{PFAS}$ moyen = 0,09 µg/kg). Cela correspond à une valeur de fonds médiane dans les

sols naturels de 0,07 µg/kg et à une valeur de fonds recommandée la plus élevée (SSTP) de 0,28 µg/kg (Reinikainen *et al.*, 2024; Reinikainen and Tarvainen, 2023). Dans les sols urbains, les teneurs en Σ_4 PFAS des sols varient de <0,03 à 110 µg/kg pour une valeur de fonds médiane de 0,755 µg/kg et une SSTP de 10,8 µg/kg. Seulement 7 échantillons présentent des teneurs supérieures à 3 µg/kg, dont 5 avec des teneurs supérieures à 20 µg/kg. Les sols les plus riches en Σ_4 PFAS sont les sols organiques et certains sols de cultures amendés avec des boues et autres matériaux organiques pour favoriser la croissance des plantes. D'autres campagnes sont prévues pour déterminer la teneur en PFAS dans des sols de surfaces organiques et des travaux sont envisagés pour mieux considérer l'apport des en PFAS via l'épandage de boues organiques sur les sols cultivés.

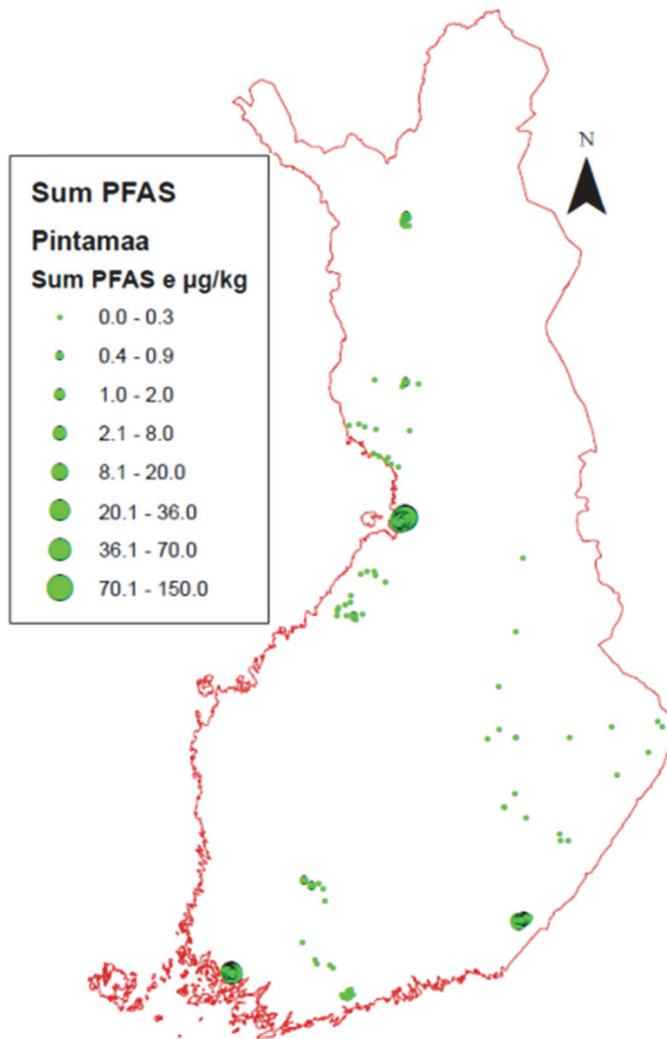


Figure 4 : Localisation des points d'échantillonnage et teneurs en PFAS des sols sur le territoire finlandais (Reinikainen *et al.*, 2024).

2.4. LES FLANDRES

2.4.1. Contexte et objectifs

Depuis 2021, le gouvernement flamand a approuvé un nouveau cadre réglementaire pour les PFAS dans le contexte de la préservation de la bonne qualité des sols et des eaux souterraines. Des campagnes ont été menées pour déterminer les valeurs de fonds en PFAS dans les sols permettant de délimiter les pollutions. Le gouvernement a ainsi financé des campagnes d'échantillonnage menées par l'agence publique flamande des déchets (l'OVAM) et la société de conseil et d'ingénierie Witteveen Boos à travers le pays (Lambrecht, 2021a, 2021b ; Van Gestel, 2023). Des valeurs seuils en PFAS et PFOS pour la remédiation des sols et la réutilisation des terres ont ainsi été déterminées (Tableau 1). Ce cadre réglementaire doit fournir des valeurs permettant de déterminer si un sol doit être considéré comme pollué ou non. En ce qui concerne la réutilisation des terres excavées, le cadre détermine la qualité minimale que les terres excavées ne doivent pas dépasser pour pouvoir être réutilisées (OVAM, 2018; Rabaey and Pancras, 2018; Touchant and Van Holderbeke, 2020).

2.4.2. Méthodologie

Soixante-quinze (75) sols de surface (0-20 cm) ont été échantillonnés dans des zones « vertes » (zones non urbaines à plus de 300 à 600 m de toutes activités identifiées dans l'inventaire des sites émetteurs de PFAS et des voies de circulation fréquentées). Les sols ont été échantillonnés dans des zones agricoles ou naturelles (ex : les sols de forêts cultivées ou non sont inclus dans cette catégorie) selon un maillage de 10 x 10 km. Ces 75 échantillons viennent compléter une base d'échantillons de 50 sols déjà acquis en 2020 (selon la même stratégie d'échantillonnage) dans des zones éloignées de toutes activités humaines (loin des sources émettrices de PFAS, des zones urbaines, des grands axes de circulation, des sites d'agriculture et d'horticulture intensives (Lambrecht, 2021a) pour couvrir les 13 624 km² du territoire.

Un total de 39 PFAS a été analysé : 8 PFASs (PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFDoS), 13 PFCAs (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFOcDA), 3 PFASAs (FOSA, MeFOSA, EtFOSA), 3 FASAAAs (FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA), 4 FTSs (4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 10:2 FTS), 2 PAPs (6:2 PAP, 8:2 PAP), 3 diPAPs (6:2 diPAP, 6:2/8:2 diPAP, 8:2 diPAP), le HPFO-DA, l'(A)DONA, et le PFECHS.

2.4.3. Résultats

Les résultats de ces campagnes montrent que seuls le PFOS, le PFOA, le 6:2 FTS et le PFBA ont été quantifiés fréquemment dans les sols à des teneurs supérieures à leur LQ. Le PFOS, le PFOA et le PFBA ont été quantifiés dans tous les sols flamands. Le 6:2 FTS est quantifié dans 54 % des échantillons de sols analysés en 2021. Les concentrations unitaires de chaque PFAS étaient généralement faibles avec un maximum ne dépassant pas les 2,6 µg/kg. Les concentrations moyennes en PFOS, PFOA et PFBA sont respectivement de 0,78, 0,56 et 0,76 µg/kg, ce qui se situe en dessous des valeurs guides actuelles (Tableau 1). Les valeurs de fonds obtenues (fixées au 90^e percentile) sont de 1,50, 0,96 et 1,25 µg/kg respectivement pour le PFOS, le PFOA et le PFBA.

2.5. L'ALLEMAGNE

2.5.1. Contexte et objectifs

Depuis 2023 l'Allemagne intensifie ses mesures nationales pour faire face aux problèmes de pollution aux PFAS. Un nouveau règlement, appelé « Mantelverordnung » ou « Règlement cadre » introduit le 1^{er} août 2023 dans l'ordonnance fédérale sur la protection des sols allemands (le BBodSchV), met en place des valeurs seuils pour le transfert sol-eaux souterraines pour plusieurs PFAS : le PFOA (0,1 µg/l), le PFBA (10 µg/l) et le PFOS (0,1 µg/l). En attendant la mise en œuvre de valeurs juridiquement contraignantes pour les PFAS dans le sol, l'Allemagne fournit une ligne directrice pour l'évaluation des PFAS avec des recommandations sur les bases et les critères d'évaluation à considérer dans les différents milieux (Biegel-Engler and Frauenstein, 2024). Dans le même temps et afin de mieux caractériser l'étendue des pollutions aux PFAS et caractériser les valeurs de fonds des sols et leur évolution temporelle, une campagne d'analyse a été lancée en 2018 (Wellnitz *et al.*, 2023) par l'Agence allemande pour l'environnement (le Umweltbundesamt).

2.5.2. Méthodologie

Tous les échantillons de sol analysés proviennent de la banque allemande de prélèvements environnementaux (ESB), une initiative de surveillance sur le long terme servant d'appui pour la gestion et de la politique environnementale. Les échantillons de sols sélectionnés ont été prélevés entre 2002 et 2019 et proviennent de 11 sites (répartis sur 9 régions) couvrant 4 types d'écosystèmes terrestres allemands différents (2 sols de zones agricoles, 2 sols de forêts, 3 sols issus de zones naturelles hors pression anthropique directe, 4 sols urbains prélevés dans deux grosses agglomérations qui sont, ou ont été, fortement industrialisées (1 sol de parc urbain, 1 sol de prairie et 2 sols de forêt). Chacun des sites a été prélevé 5 fois entre 2002 et 2018, soit un total de 55 échantillons analysés. Seule la partie disponible du sol la plus superficielle a été analysée (0-20 cm).

Un total de 24 PFAS a été quantifié (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTeA, PFTeA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, 4:2, 6:2 et 8:2 FTS, PFOSA, MeFOSAA, et EtFOSAA) ainsi que le dosage des précurseurs oxydables totaux (TOP).

2.5.3. Résultats

Les résultats de cette campagne montrent que les concentrations médianes en Σ_{PFAS} dans les sols varient de 0,31 à 19,7 µg/kg et de 0,32 à 20,4 µg/kg, respectivement avant et après le dosage du TOP. Les PFAS les plus fréquemment mesurés au-dessus de la LQ (0,1 µg/kg) sont le PFOS et le PFOA qui représentent entre la moitié et les deux tiers du Σ_{PFAS} sur chaque site. Ainsi les concentrations unitaires pour chaque PFAS sont généralement $\leq 4,5$ µg/kg et atteignent au maximum 12,0 µg/kg. Les valeurs moyennes de Σ_{PFAS} , Σ_{PFCAs} et Σ_{PFSA} sur toutes les années sont respectivement de 5,07, 2,68 et 2,19 µg/kg (médianes de 5,40, 2,84 et 2,56 µg/kg). La valeur moyenne du PFOA sur tous les sites est de 1,00 µg/kg (médiane de 0,81 µg/kg).

Les échantillons de sols naturels et de forêts présentent un Σ_{PFAS} plus élevé que les sols urbains/industriels (Σ_{PFAS} moyen entre 4,7 et 19,7 µg/kg contre de 0,51 à 3,4 µg/kg pour les sols urbains/industriels). Le Σ_{PFAS} après le test TOP ont subi une augmentation de moins de 20 % indiquant que les composés précurseurs ne jouent pas un rôle majeur dans le Σ_{PFAS} . La teneur en Σ_{PFAS} est positivement corrélée à la teneur en carbone organique totale (COT) pour les sols analysés. Les niveaux de Σ_{PFAS} sont constants dans les échantillons de sol sur la période investiguée.

2.6. D'AUTRES EXEMPLES HORS EUROPE

2.6.1. États-Unis d'Amérique

Aux États-Unis, un plan d'action est mené par l'Agence de la Protection Environnemental (EPA) depuis 2021 pour acquérir plus de connaissances sur le comportement des PFAS et limiter leur diffusion dans l'environnement. Dans ce contexte, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été lancées dans différents états pour déterminer des valeurs de fonds en PFAS dans les sols. Ces valeurs doivent servir à délimiter plus efficacement les pollutions et constituer des informations contextuelles importantes pour évaluer la nature, l'étendue et les risques associés aux constituants rejetés dans l'environnement. Ces valeurs de fonds doivent aussi permettre une potentielle réévaluation des normes de PFAS dans les sols existant dans certains états des États-Unis (EPA 2022).

Dans le Maine, 64 sols de surface (0-25 cm) ont été prélevés à travers 16 comtés (Figure 5, Roakes and Zemba, 2022). Trente-deux (32) échantillons ont été prélevés dans des zones urbaines et 32 dans des zones non urbaines éloignées des sources d'émission connues ou suspectées de PFAS (ex : à plus de 15 m des routes, 30,5 m des voies ferrées, 152 m de stations de pompier, et 914 m d'aéroports et de déchèteries) pour y analyser la concentration en 28 PFAS : PFOcDA, PFHxDA, PFTeA, PFTrDA, PFDODA, PFUnDA, PFDA, PFNA, PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA, PFDS, PFNS, PFOS, PFHpS, PFHxS, PFPeS, PFBS, 4:2, 6:2, 8:2 FTS, PFOSA, EtFOSAA, MeFOSAA, HPFO-DA, (A)DONA (Maine DEP, 2021). L'objectif était d'établir des valeurs de fonds en PFAS pour les sols naturels et urbanisés. Les sites sélectionnés sont séparés d'au moins 3 km. Les PFAS les plus souvent quantifiés sont le PFOS, le PFOA, le PFBA, le PFHpA et le PFNA. La concentration moyenne de chaque PFAS (concentration unitaire) varie de <0,03 (Limite de quantification) à 9,51 µg/kg. Les valeurs de fond obtenues sont de 2,18 µg/kg pour le PFOA et 3,04 µg/Kg pour le PFOS (Tableau 1).

En 2018, 68 échantillons de sols ont été prélevés à travers l'état du Vermont pour y mesurer la présence de 18 PFAS : PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFTTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFOcDA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS, et le M8PFOA (Zhu *et al.*, 2019). Les échantillons de sol ont été prélevés dans le cadre d'une étude du VTDEC (Département de la conservation de l'environnement du Vermont) sur les niveaux d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAPs), d'arsenic et de plomb des sols. Les sites échantillonnés ont été sélectionnés en superposant une grille de 160 km² à travers l'État, en identifiant la plus grande municipalité dans chaque grille, puis en échantillonnant dans la ville, les parcs, les forêts, les espaces verts, ou les pelouses des zones urbaines afin d'y établir une valeur de fonds globale des sols. Les données montrent que les concentrations de chaque PFAS (concentrations unitaires) dans les sols varient de <0,03 (LQ la plus basse) à 9,7 µg/kg selon les substances. La $\sum_{18 \text{ PFAS}}$ varie ainsi de 0,54 à 35 µg/kg pour les échantillons analysés. Les valeurs de fonds obtenues sont de 1,6 µg/kg pour le PFOA et 3,4 µg/kg pour le PFOS (Tableau 1) qui sont les deux PFAS les plus fréquemment quantifiés au-dessus de la LQ.

En 2020, dans l'état du Massachusetts 100 échantillons de sol de surface (0-15 cm) ont été prélevés sur 25 sites à travers le territoire pour y analyser la concentration en 36 PFAS (seul les 9 PFAS qui ont été détectés dans au moins 1 échantillon sont mentionnés, soit : le PFOS, le PFOA, le PFNA, le PFDA, le PFHpA, le PFBA, le PFUnDA, le PFHxA et le PFPeA (Mcintosh *et al.*, 2023). Les sites ont été sélectionnés dans des zones naturelles sans aucune source connue d'émission en PFAS. Les échantillons ont été prélevés en dehors des chemins ou sentiers, et surtout dans les zones de forêts pour obtenir des valeurs de fonds de sols naturels (sols hors pressions anthropiques directes). Cette étude révèle que 88 % des sols échantillonnés contiennent au moins 1 des 36 PFAS recherchés. Les PFAS les plus souvent quantifiés sont le PFOS, le PFOA, le PFNA et le PFDA. Les concentrations de chaque PFAS varient en moyenne de <0,03 (LQ la plus basse) à 6 µg/kg. Les valeurs de fonds obtenues sont proches de celles des sols naturels du Maine et du Vermont : 2,15 µg/kg pour le PFOA et 3,64 µg/Kg pour le PFOS (Tableau 1).

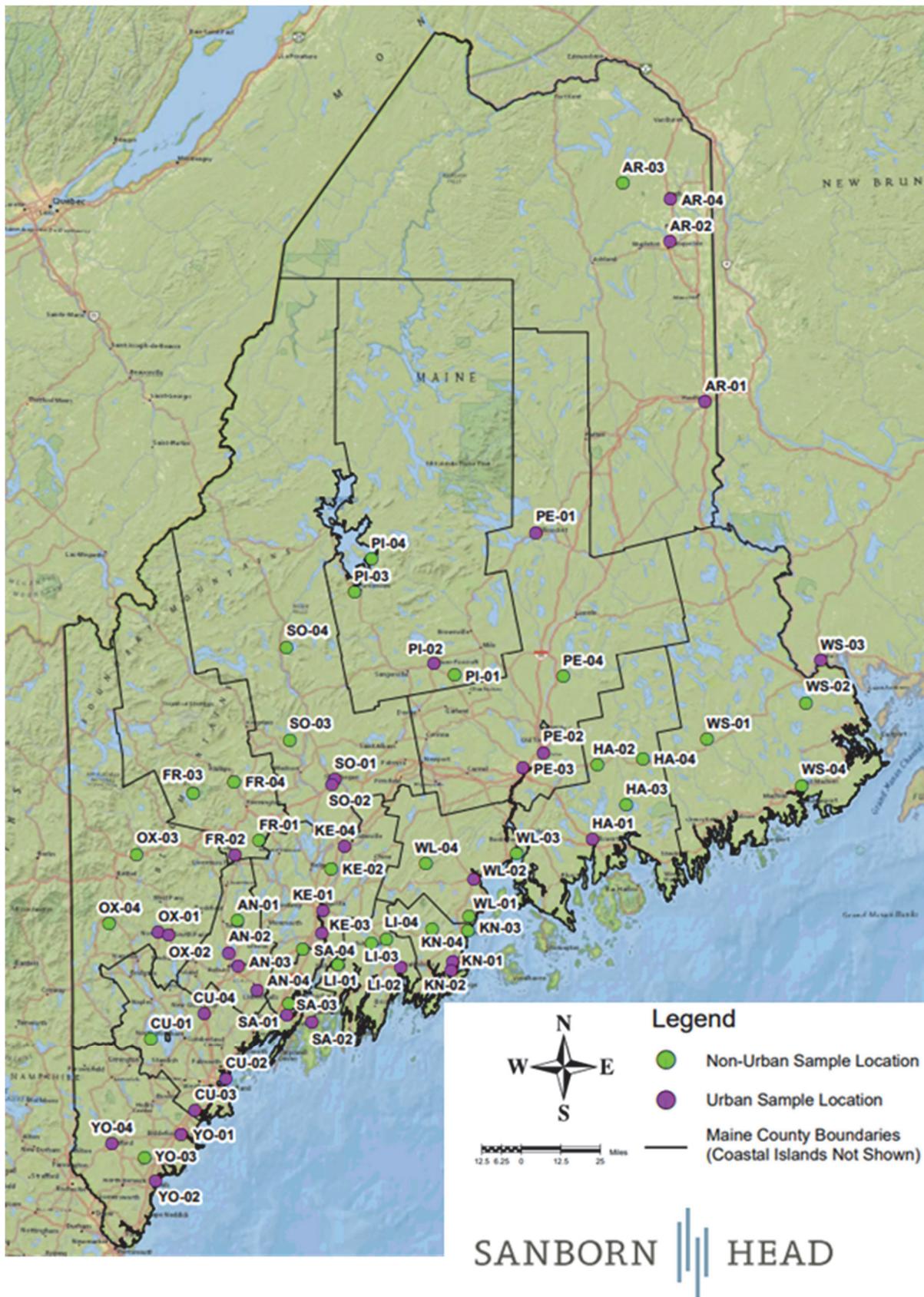


Figure 5 : Implantation du réseau d'échantillonnage pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS des sols du Maine (USA), (d'après Roakes and Zemba, 2022).

2.6.2. D'autres exemples à travers le monde

D'autres travaux visant à déterminer les teneurs en PFAS des sols existent (Tableau 2). L'objectif de ces travaux n'est pas de déterminer des valeurs de fonds pour délimiter les pollutions mais plutôt de mieux comprendre le transfert des PFAS depuis les zones sources, les transferts sols-plantes depuis les cultures, et/ou mieux estimer les risques sanitaires liés à ces substances. Bien que les données ne soient pas toujours comparables (variation du nombre de PFAS quantifié), ces données montrent que les \sum_{PFAS} (somme des PFAS quantifiés, incluant, selon les travaux, de 2 à 32 PFAS) dans l'ensemble des sols investigués sont majoritairement comprises entre <0,05 (limite de détection) et 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et sont cohérentes avec les valeurs de fonds obtenues pour quelques PFAS dans certains pays européens et américains pour les sols urbains (Tableau 1). Certaines teneurs en PFAS, plus élevées, correspondent aux zones à proximités de sources d'émission connues, et ne sont donc pas directement comparables aux valeurs de fonds existantes (Brusseau *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2016; Heimstad *et al.*, 2018).

Tableau 2 : Synthèse des autres travaux portant sur la détermination de teneurs en Σ PFAS dans des sols.

| PFAS recherchés | PFAS majoritaires | Teneurs en Σ PFAS des sols ($\mu\text{g}/\text{kg}$) | No. éch | Stratégie | Pays | Références |
|-------------------------------|---|---|---------|--|--------------|-----------------------|
| Sols de forêt | | | | | | |
| 2 PFAS | PFOA et PFOS | [2 PFAS] : <0,0009-0,0117 | 54 | Sols naturels de montagne boisés pris aléatoirement dans toute la Chine, de 0-10 cm. Ech. composite de 5 échantillons /m ² . | Chine | Wang et al., 2018 |
| Sols arables/agricoles | | | | | | |
| 17 PFAS | PFUnDA, PFDoDA, et PFTrDA | [17 PFAS] : 0,12- 13,9 | 30 | Echantillons de sols de rizières pris dans 5 régions différentes du pays. | Corée du Sud | Kim et al., 2019 |
| 2 PFAS | PFOA, PFOS | [2 PFAS] : <0,05-1,85 | 243 | Sols prélevés dans des zones agricoles situées en aval de stations d'épuration dans différentes villes à travers 5 provinces différentes. | Corée du Sud | Choi et al., 2017 |
| 26 PFAS | PFOS | [26 PFAS] : 1,7-7,9 | 9 | 9 sites, de 0-25 cm. | Uganda | Dalahmeh et al., 2018 |
| Tous types de sols | | | | | | |
| 32 PFAS | PFOS, PFOA, PFHxA | [32 PFAS] : 0,036-17,57 | 62 | Echantillons collectés aléatoirement à travers le monde dans des zones à priori non impactées par des activités émettrices en PFAS. | 22 pays | Rankin et al., 2016 |
| 13 PFAS | PFOS, PFOA, PFDoDA, PFHpA, PFHxA | [13 PFAS] : 0,5-150 | 100 | 10 échantillons sélectionnés pour 6 pays à partir d'une collection d'échantillons de sols de surface frais et archivés pour représenter une large gamme de caractéristiques chimiques et physiques loin de toutes sources émettrices en PFAS. | 6 Pays | Strynar et al., 2012 |
| 2-32 PFAS | | [2-32 PFAS] : 0,001-237 | / | Synthèse bibliographique | Monde | Brusseau et al., 2020 |
| 2 PFAS | PFOA et PFOS | [2 PFAS] : 0-1,623 | 33 | 8 échantillons pris dans des sites industriels émetteurs de PFAS, 13 dans des zones urbaines de différentes densités de population, 11 sur des sols agricoles cultivés, boisés et des prairies, et 1 contrôle sans aucune source de pollution connue. Ech. composite : 5 prélèvements par sites de 0 à 5 cm. | Corée du Sud | Kim et al., 2014 |
| 19 PFAS | PFDA, PFUnDA | [19 PFAS] : 2,5-8,8 | 20 | Sols agricoles, sols urbains, sols industriels le long d'une rivière. | Corée du Sud | Seo et al., 2019 |
| 17 PFAS | PFOA et PFUnDA | [17 PFAS] : 0,622-5,09 | 17 | Echantillons prélevés dans le bassin versant du réservoir de Yuqiao. Ech. composites de 5 éch. Pour 100 m ² de 0 à 20 cm. | Chine | Cao et al., 2019 |
| 17 PFAS | PFOA, PFDA, PFBA et PFOS | [17 PFAS] : 0,33-65,76 | 76 | Sols prélevés dans les zones rurales autour de 8 villes proches d'une rivière. | Chine | Chen et al., 2016 |
| 16 PFAS | | [16 PFAS] : 1,12-104 | 5 | Ech composite de 3 éch de 0-10 cm dans différents types de sols. | Norvège | Heimstad et al., 2018 |
| 16 PFAS | 10-16 PFAS quantifiés dont PFBS et PFOA | [16 PFAS] : 0-1,78 | 14 | Ech de sols prélevés le long de la rivière Koshi en zones urbaines. Ech composite de 5 éch. Par 100 m ² . | Népal | Tan et al., 2014 |
| 12 PFAS | PFOS et PFDA | [12 PFAS] : 0,3-3,9 | 15 | Sols de zones côtières et d'estuaires, pris en surface (1- 5 cm). | Corée du Sud | Naile et al., 2013 |

Σ PFAS : somme des PFAS quantifiés, incluant, selon les travaux, de 2 à 32 PFAS.

2.7. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES

Les données collectées montrent que peu de pays ont, à ce jour, mené des campagnes pour déterminer les valeurs de fonds en PFAS de leurs sols ni établi de valeurs guides pour la gestion des sols pollués aux PFAS en raison :

- d'un manque de données sur les PFAS et les précurseurs à rechercher dans les sols en fonction des sources d'émission identifiées ;
- la difficulté de monter un réseau d'échantillonnage permettant la collecte d'un grand nombre d'échantillons à l'échelle d'un territoire ;
- un manque de laboratoires en capacité d'effectuer ces analyses, surtout pour les études les plus anciennes.

Pour les pays qui se sont prêtés à l'exercice, l'objectif est généralement le même : être capable de mieux délimiter les pollutions en PFAS de ce qui relève du fond. Cependant, les méthodologies mises en place diffèrent entre ces pays, selon les objectifs. On peut distinguer :

- les campagnes visant les sols les plus naturels possibles (ex : Suède) ;
- les campagnes visant à différencier des valeurs de fonds en fonction du type de pression anthropique (urbain ou non urbain) ;
- les campagnes visant indifféremment tous les types de pression anthropique (exceptés les spots de pollution) pour obtenir des valeurs de fonds les plus élevées possibles et qui intègrent les sources d'émissions diffuses.

Ce retour d'expérience montre que le nombre d'échantillons prélevé est généralement inférieur à 1 échantillon /100 km². La répartition des points d'échantillonnage n'est pas toujours régulière et selon un maillage précis car elle doit souvent être adaptée à des réseaux d'échantillonnage existant mais aussi aux distances vis-à-vis des sources d'émissions et à l'occupation ou l'usage des sols.

Le nombre de paramètres mesurés varie de 18 à 39 (Tableau 3). Les substances les plus recherchées et quantifiées dans les sols sont : PFBS, PFHxS, PFOS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFOSA, EtFOSAA et le 6:2 FTS. Ces substances sont non seulement communes à de nombreuses sources d'émission en PFAS mais font également partie des produits de transformation de nombreux précurseurs (Cavelan et Togola, 2024a, BRGM/RP- 73452 -FR), elles ont donc une grande probabilité d'être présentes dans les sols français au-delà des LQ. Au contraire, PFPeS, PFDS, PFNS, PFHxDA, PFOcDA, MePFOSA, EtPFOSA, MeFOSAA, les 4:2, 8:2 et 10:2 FTS ont souvent été recherchés mais non quantifiés. Enfin, certaines substances ont été quantifiées à de fortes teneurs dans les sols (ex : FOSAA, 6:2 PAP, 8:2 diPAP) mais trop peu de données sont disponibles pour le généraliser.

Le mode de calcul des valeurs de fonds varie aussi selon les études en correspondant parfois au P₉₅ ou au P₉₀ (95^e et 90^e percentiles des données mesurées), avec une substitution par 0, LQ/2 ou une suppression des valeurs censurées (< LQ) du jeu de données utilisé, ce qui peut changer fortement le résultat obtenu. La procédure appliquée n'est d'ailleurs pas toujours explicitée.

En dépit de différences méthodologiques, les données montrent que les concentrations des \sum_{PFAS} dans les sols en dehors de sources d'émission directes à travers le monde sont comparables et souvent comprises entre 0 et 10 µg/kg dans les sols urbains et 0 et 6 µg/kg dans les sols non urbains (Tableaux 1, 2). Ce résultat est en cohérence avec les valeurs de fonds obtenues pour la \sum_{PFAS} généralement entre 5 et 11 µg/kg pour les sols urbains et 0,3 et 4 µg/kg pour les sols non urbains. Cela donne un aperçu de la gamme des teneurs en PFAS auxquelles on peut s'attendre dans les sols français.

Tableau 3 : Synthèse des substances quantifiées (gris foncé), recherchées mais non quantifiables (teneurs < LQ), (en gris clair), ou non recherchées (en blanc) pour chaque étude visant à lever des valeurs de fonds en PFAS des sols. Les valeurs représentent la concentration moyenne de la substance en µg/kg mesurée dans les sols si disponible.

| Etudes | Pays/Etat | Sols | PFBS | PFPEs | PFHKS | PFHpS | PFOS | PFNS | PFDS | PFUnDS | PFDoS | PFTtDS | PFBA | PFPeA | PFHxA | PFHpA | PFOA | PFNA | |
|--------------------------|---------------|--|---------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|-----------|---------------|-----------|-------------|--------|-------|-------|-------|------|
| | | | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,02 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,01 | <LQ | 0,01 | 0,04 | 0,01 |
| Reinikainen et al., 2024 | Finlande | Naturels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,02 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,01 | <LQ | <LQ | 0,01 | 0,04 | 0,01 | |
| Kikuchi et al., 2018 | Finlande | Urbains | <LQ | <LQ | 0,05 | 0,03 | 7,02 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,11 | <LQ | <LQ | 0,09 | 0,56 | 0,16 | |
| Sörensgård et al., 2022 | Suède | Naturels | 0,29 | <LQ | 0,10 | 0,43 | 0,43 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,04 | 0,04 | 0,09 | |
| Wintersen et al., 2020 | Pays-Bas | Naturels/agricoles | <LQ | <LQ | 0,07 | <LQ | 0,56 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,14 | 0,07 | 0,72 | 0,25 | 0,32 | 0,32 | |
| Lambrecht, 2021a, 2021b | Flandres | Urbains/industriels | 0,07 | <LQ | 0,07 | <LQ | 0,89 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,23 | 0,14 | 0,08 | 0,08 | 0,70 | 0,08 | |
| Wellmitz et al., 2023 | Allemagne | Agricole/naturels | 0,25 | <LQ | <LQ | <LQ | 0,78 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,76 | 0,27 | 0,11 | 0,11 | 1,05 | 0,09 | |
| Wellmitz et al., 2023 | Allemagne | Naturels/agricoles/urbains/industriels | 1,61 | <LQ | 0,17 | 0,11 | 3,84 | 0,1 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1,61 | 0,37 | 0,43 | 0,46 | 1,59 | 0,78 | |
| Roakes and Zemba, 2022 | Maine | Sols urbains/non urbains | 0,074 | <LQ | 0,212 | 0,449 | 3,19 | <LQ | 9,51 | 9,51 | <LQ | <LQ | 0,13 | 0,23 | 0,81 | 0,2 | 0,59 | 0,76 | |
| Zhu et al., 2019 | Vermont | Urbains/non urbains | 0,23 | 0,2 | 0,2 | 1,1 | 1,1 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,52 | 0,26 | 0,52 | 0,27 | |
| Mcintosh et al., 2023* | Massachusetts | Naturels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1,29 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | n.c. | n.c. | 0,46 | 0,76 | 0,76 | 0,45 | |
| Etudes | Pays/Etat | Sols | PFDA | PFUnDA | PFDoD | PFTHD | PFTeD | PFHxDA | PFOSA | MePFOS | EtPFOSA | MeFOSE | MeFOSE | EtFOSE | Me | Me | EtFOS | FOSAA | |
| Reinikainen et al., 2024 | Finlande | Naturels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |
| Kikuchi et al., 2018 | Finlande | Urbains | 0,32 | 0,07 | 0,08 | <LQ | 0,02 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,70 | 0,07 | <LQ |
| Sörensgård et al., 2022 | Suède | Naturels | 0,12 | 0,22 | 0,05 | 0,35 | 0,02 | <LQ | 0,22 | <LQ | <LQ | 0,15 | <LQ | 0,02 | 0,09 | <LQ | <LQ | 0,27 | <LQ |
| Wintersen et al., 2020 | Pays-Bas | Naturels/agricoles | 0,32 | 0,39 | 0,17 | 0,14 | 0,20 | 0,09 | 0,34 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,52 | <LQ |
| Lambrecht, 2021a, 2021b | Flandres | Urbains/industriels | 0,07 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,07 | 0,07 | <LQ |
| Lambrecht, 2021a, 2021b | Flandres | Agricole/naturels | 0,08 | 0,07 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,07 | 0,08 | <LQ | |
| Wellmitz et al., 2023 | Allemagne | Naturels/agricoles/urbains/industriels | 0,21 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Wellmitz et al., 2023 | Allemagne | Naturels/agricoles/urbains/industriels | 0,6 | 0,64 | 0,34 | 0,32 | 0,21 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Roakes and Zemba, 2022 | Maine | Sols urbains/non urbains | 2,05 | 0,79 | 2,11 | 1,18 | 0,33 | 0,2 | 2,68 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,56 | 2,97 | <LQ | <LQ | |
| Zhu et al., 2019 | Vermont | Urbains/non urbains | 0,31 | 0,15 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Mcintosh et al., 2023* | Massachusetts | Naturels | 0,41 | n.c. | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Etudes | Pays/Etat | Sols | HPFO-DA | HPFHpA | 4:2 FTS | 6:2 FTS | 8:2 FTS | 10:2 FTS | 6:2 PAP | 8:2 PAP | 6:2 diPAP | 6:2/8:2 diPAP | 8:2 diPAP | PF-3,7-DMOA | (A)DON | A | A | A | |
| Reinikainen et al., 2024 | Finlande | Naturels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Kikuchi et al., 2018 | Finlande | Urbains | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Sörensgård et al., 2022 | Suède | Naturels | <LQ | <LQ | 0,43 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Wintersen et al., 2020 | Pays-Bas | Naturels/agricoles | <LQ | <LQ | 1,49 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Wintersen et al., 2020 | Pays-Bas | Urbains/industriels | <LQ | <LQ | 0,09 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Lambrecht, 2021a, 2021b | Flandres | Agricole/naturels | 0,08 | <LQ | 0,09 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Lambrecht, 2021a, 2021b | Flandres | Naturels/agricoles/urbains/industriels | <LQ | <LQ | <LQ | 0,41 | <LQ | <LQ | 0,94 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Wellmitz et al., 2023 | Allemagne | Naturels/agricoles/urbains/industriels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Roakes and Zemba, 2022 | Maine | Sols urbains/non urbains | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0,962 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Zhu et al., 2019 | Vermont | Urbains/non urbains | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Zhu et al., 2019 | Vermont | Urbains/non urbains | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |
| Mcintosh et al., 2023* | Massachusetts | Naturels | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | |

*Cette étude ne mentionne que les 9 des 40 PFAS recherchés et quantifiés au-delà de la LQ dans les sols. Les autres 31 PFAS recherchés dont les concentrations étaient < LQ ne sont pas mentionnés. n.c. : valeur non communiquée.

3. Quelle méthodologie développer en France ?

Ce travail de synthèse montre que mettre en place une méthodologie pour la détermination de valeurs de fonds en PFAS dans les sols français nécessite de lever plusieurs interrogations : quel est l'objectif et l'utilisation de la valeur de fonds ? (discriminer les sites émetteurs de l'imprégnation diffuse ?, valoriser les terres excavées ?, vérifier le bon état sanitaire des lieux de vie ? ...). Selon ces objectifs, les stratégies d'échantillonnage à mettre en place pour collecter les données, les paramètres à mesurer dans les sols et les performances analytiques à y associer pourront être déterminés.

Au vu des données collectées, ce paragraphe discute les éléments disponibles sur lesquels la méthodologie pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS pourrait se construire en France.

3.1. QUE SIGNIFIE LE TERME VALEURS DE FONDS EN FRANCE ?

Le terme « fonds » désigne généralement la concentration d'une substance dans le sol (ou le sous-sol) d'un territoire, à une profondeur donnée (ADEME, 2018). On peut distinguer le fond géochimique qui désigne la gamme de teneurs d'une substance dans le matériau parental (Figure 6), le fond pédo-géochimique naturel qui n'a pas subi d'influence des activités anthropiques et le fond pédo-géochimique anthropique qui est issu d'un apport diffus causé par les activités humaines, actuelles ou passées (retombées atmosphériques, substances introduites par les pratiques agricoles, des remblais, etc.).

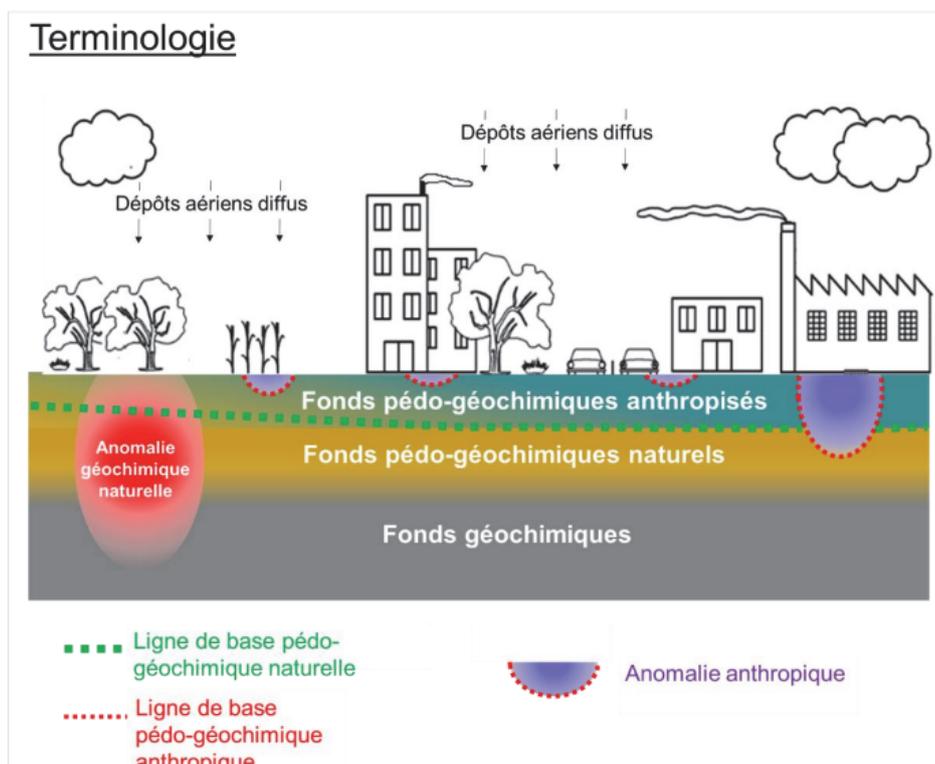


Figure 6 : Termes liés aux valeurs de fonds (Guide pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols, ADEME 2018).

Contrairement à d'autres polluants pour lesquels une source naturelle peut exister dans les sols (ex : polluants métalliques), les PFAS sont uniquement des produits de synthèse, et n'existent pas à l'état naturel dans les matériaux géologiques. Il n'est donc pas pertinent de considérer un réel fond pédo-géochimique naturel pour les PFAS. Néanmoins le transport atmosphérique en dehors de toute zone sous influence directe entraîne une contamination ubiquiste diffuse non négligeable. Les récents travaux démontrant la présence de PFAS dans les pluies dans des zones hors de toute pression industrielle, que ce soit aux États-Unis (Olney *et al.*, 2023) ou en France, (Berthou *et al.*, 2024) étayaient cet intérêt (SFSE, 2023). Ainsi même les sols « naturels » en dehors de toutes pressions anthropiques directes peuvent contenir des PFAS (issus par exemple de retombées atmosphériques distales).

Lors de la détermination des valeurs de fonds dans les autres pays d'Europe, le terme « valeurs de fonds » n'est que très rarement défini et la distinction quand elle est faite entre les différents usages du sol repose surtout sur la distinction entre sols urbains et sols « non urbains » (exemple des Pays-Bas, de la Finlande ou du Maine). En raison de l'ubiquité des substances considérées, et des usages indirects (exemple épandage de boues), la qualification de « sols naturels » apporte une ambiguïté puisque dans certains cas les sols agricoles (subissant les épandages de boues) y sont inclus. Dans ce cas, les sols agricoles sont rattachés à tort aux sols naturels. En conséquence, un travail sur les typologies de sols à considérer pour chacune des classes de valeurs de fonds est à mener en amont.

Tableau 4 : Exemple de types de valeurs de fonds en PFAS ayant été déterminées pour les sols et leurs applications possibles.

| Type de valeurs de fonds | Fond pédo-géochimique peu anthropisé (valeur de fonds des sols dit « naturels » ou en dehors de toutes pressions anthropiques directes) | Fond pédo-géochimique anthropisé (valeur de fonds des sols anthropisés incluant tous les sols soumis à une pressions anthropique directe sans distinction). | Fonds pédogéochimiques de sols urbains, non urbains ou « naturels ». |
|-----------------------------|---|---|--|
| Contraintes méthodologiques | Sites échantillonnés éloignés de toutes activités humaines. | Sites éloignés des sources directes de pollution en PFAS. Tous les sols étant ou ayant été affectés par une activité anthropique peuvent être échantillonnés. | Combinaison des approches. Les sols soumis à une pression anthropique directe en zone urbaine et non urbaine et ceux hors de toutes pressions anthropiques directes sont tous ciblés mais séparément. |
| Types de sols | Sols de forêts (hors sylviculture), de prairies (non utilisée par l'homme pour la pâture), autres zones naturels éloignés de toutes activités humaines. Les sols urbains, agricoles, et les parcs ne peuvent être échantillonnés. | Tous les types de sol sans distinction. | Tous les types de sol mais avec une distinction selon les usages des sols (ex : distinction entre les sols « naturels » et les sols urbains et non urbains). |
| Caractéristiques attendues | Teneurs en PFAS attendues relativement faibles (uniquement des apports de pollution très diffuse). | Teneurs en PFAS attendues plus élevées liées aux pollutions diffuses (ex: retombées atmosphériques) et aux activités humaines (ex: épandage de boue sur les parcelles agricoles). | Plusieurs valeurs de fonds, deux plus élevées pour les sols fortement anthropisés (urbains, et non urbains) et une plus faible pour les sols « naturels » (défini ici comme les sols en dehors de toutes pressions anthropiques directes). |
| Usage possible | Délimiter les pollutions issues de sources directes ou diffuses (limitation importante des risques sanitaires) | Délimiter surtout les pollutions directes en PFAS (limitation moins importante des risques sanitaires) | Délimiter tous les types de pollution en s'adaptant au contexte du site (limitation importante des risques sanitaires). |
| | Exemple : Suède, Massachusetts | Ex: Flandres, Vermont, Allemagne | Exemple : Pays-Bas, Finlande, Maine |

La localisation des points d'échantillonnage, mais aussi la gamme des teneurs mesurées peut drastiquement varier selon le type de valeurs de fonds à déterminer. Avant de mettre en place la stratégie d'échantillonnage, il est donc primordial de définir quels types de valeurs de fonds sont attendus et à quoi doivent servir les informations recueillies. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 4.

3.2. QUELLES SONT LES MÉTHODOLOGIES EXISTANTES POUR DÉTERMINER DES VALEURS DE FONDS EN FRANCE ?

En France, la méthodologie à mettre en place pourrait s'inspirer des méthodologies et des normes appliquées pour déterminer les valeurs de fonds de différents polluants organiques et inorganiques dans les sols (ADEME, 2018; Belbèze *et al.*, 2023; NF EN ISO 19258 : 2018 Qualité du sol - Recommandations pour la détermination des valeurs de fonds). Les méthodologies diffèrent généralement selon l'échelle de l'étude (échelle territoriale ou échelle d'un site) mais tiennent compte de l'organisation des sols et des sous-sols naturels et de la localisation des sources émettrices de polluants puisque la profondeur et la distance à la source affecte les valeurs de fonds.

De manière générale, le déploiement des méthodologies pour établir des valeurs de fonds repose sur trois étapes : (1) la définition de la stratégie et du réseau d'échantillonnage, (2) l'acquisition de données (collecte de données existantes et/ou prélèvements sur le terrain), et (3) l'interprétation des données (généralement statistique et géostatistique). À l'échelle territoriale, la méthode qui semble la plus adaptée pour la détermination de valeurs de fonds est d'interpréter statistiquement ou géostatistiquement des données obtenues en choisissant des lieux représentatifs directement à l'échelle du territoire (sans zonation), ce qui nécessite un plus grand nombre de données réparties de manière la plus homogène possible sur la surface à couvrir (Belbèze, 2019, projet [GéoBaPa](#), [BDSolU](#)).

Selon cette méthode, différentes stratégies peuvent être déployées pour le positionnement des points d'échantillonnage (norme SFS-ISO-standard 19 258, ADEME, 2018; Belbèze *et al.*, 2023). En vue d'une utilisation géostatistique des données, c'est la stratégie d'échantillonnage systématique qui doit être recommandée. Elle consiste en un maillage régulier du territoire ou des EGC (Figure 7a). C'est la méthode mise en place dans les Flandres et le Vermont pour déterminer les valeurs en PFAS des sols et c'est aussi la stratégie généralement employée par les programmes de surveillance nationaux. Dans les autres cas, une stratégie typologique, correspondant à un échantillonnage guidé par milieux cohérents (milieux urbain, agricole, forestier...), peut être appliquée (Figure 7b). C'est la stratégie appliquée dans les Pays-Bas et la Finlande pour la détermination des valeurs de fonds en PFAS (zones urbaines et non urbaines). Lors d'échanges avec les équipes en charge de déployer cette stratégie, il a été mentionné que mettre en place dans certaines zones urbaines à forte densité industrielle un maillage régulier s'est avéré impossible. Une stratégie typologique, adaptée sur le terrain (prélèvement à moins de 800 m d'un site industriel) a finalement été mise en œuvre. Dans tous les cas, les données doivent être suffisamment dispersées au sein de l'entité géographique pour mettre en évidence toute variabilité spatiale des valeurs mesurées.

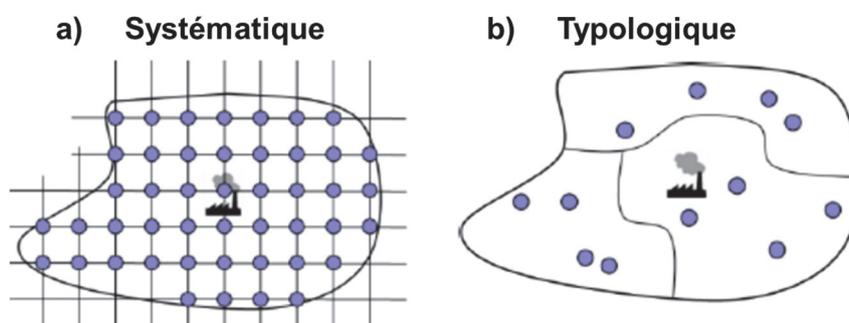


Figure 7 : Exemple de stratégies d'échantillonnage (d'après ADEME, 2018).

On estime qu'un minimum d'une trentaine de valeurs représentatives est nécessaire pour réaliser une analyse statistique robuste (ADEME, 2018) d'une zone dénommée Entité Géographique Cohérente. On retrouve ce même nombre minimum d'échantillons dans la norme SFS-ISO-standard 19258 pour la détermination des valeurs de fonds. Les retours d'expériences des pays européens et des états américains montrent que soixante à cent échantillons sont généralement utilisés pour couvrir tout le territoire (Tableau 1). À noter que ce nombre d'échantillons peut être élargi pour une meilleure représentativité des résultats de l'analyse statistique.

3.3. QUEL RÉSEAU D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA COLLECTE DES DONNÉES ?

L'échantillonnage de sols en vue d'une détermination de valeurs de fonds en PFAS en milieu rural en France pourrait s'appuyer sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) (Jolivet *et al.*, 2018). Ce réseau est issu d'un programme national coordonné par l'unité Info&Sols d'INRAE Val-de-Loire (<https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>). Ce réseau a été mis en place en 2000 pour répondre aux objectifs d'évaluation et de suivi à long terme de la qualité des sols sur le territoire français. Il repose sur le suivi de 2 240 sites répartis uniformément sur le territoire français (métropole et outre-mer) selon une grille de maille carrée de 16 km de côté (soit 0,4 échantillon par 100 km², Figure 6). Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont effectués tous les quinze ans au centre de chaque maille, soit environ 180 sites prélevés et analysés chaque année. Les sols collectés sont de différents types (friches, sols agricoles, sols de forêts, prairies, parcs et jardins, Figure 8), en évitant volontairement tout sol urbain.

L'utilisation de ce réseau permettrait de déterminer des valeurs de fonds intégrant les sols « naturels » (ou faiblement anthropisés) ainsi que les sols impactés par l'épandage de boues, source non négligeable de contamination en PFAS. Les données obtenues dans le cadre des collectes nationales des teneurs en éléments en traces métalliques des sols susceptibles d'être soumis à l'épandage de boues d'épuration urbaines, rassemblées dans la Base de Données des Éléments en Traces Métalliques (BDETM), pourraient permettre d'identifier les sols soumis à l'épandage de boues. L'action 4 (sous-action 8) du plan interministériel PFAS piloté par la DGPR, l'ADEME et le GIS Sol prévoit justement l'inclusion de l'analyse de PFAS dans la campagne d'échantillonnage de sols du RMQS à partir de 2024 afin d'initier la surveillance de PFAS dans les sols. En complément, un échantillonnage intégrant des sols en milieux urbains ou péri-urbains permettrait de déterminer des valeurs de fonds en PFAS correspondant plus à la notion de fond pédo-géochimique anthropisé urbain utilisée en SSP. Ce réseau pourrait s'appuyer sur la structure d'accueil des données et le calcul des fonds de la base de données BDSoLU. En effet, le versement des résultats dans la BdSoLU pourrait permettre de capitaliser les données relatives à ces prélèvements et leurs analyses et de pouvoir en déterminer des valeurs de fonds.

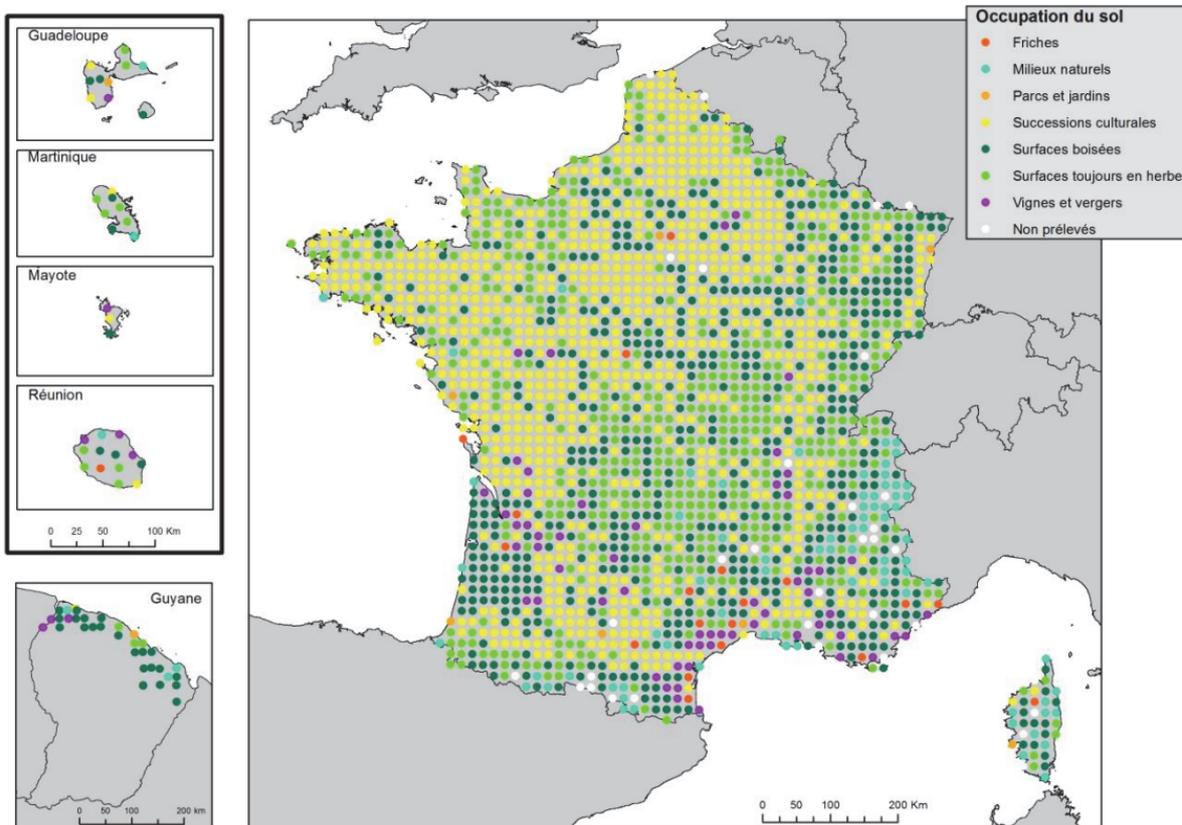


Figure 8 : Implantation du réseau RMQS (d'après Jolivet et al., INRAE 2018).

3.4. QUELS INDICATEURS MESURER ?

Si l'on reprend les différentes études ayant mené à l'élaboration de valeurs de fonds, la liste des PFAS analysés est finalement assez restreinte (47 substances, Tableau 3), au regard de l'ampleur de l'« univers » de cette famille de substances (en partie en raison des capacités analytiques des laboratoires fortement contraintes).

L'identification des molécules dont l'analyse serait la plus pertinentes pour l'établissement de valeurs de fonds souffre du manque de connaissances antérieures sur la qualité chimique des sols vis-à-vis des PFAS au niveau national. Toutefois, l'amélioration des performances analytiques et le développement en cours de méthodes normalisées (CEN TC 444/WG2) permettent à ce jour de proposer des listes de composés analysables simultanément, donc sans surcoût notable. Le recours à ces techniques permettrait à la fois d'acquérir des premières données pour caractériser les niveaux d'imprégnation des sols français, et d'identifier les molécules les plus pertinentes pour l'établissement de valeurs de fonds.

Enfin, la littérature n'intègre pas certaines sources de PFAS comme l'utilisation de mousses anti-incendie (AFFF, Aqueous film forming foam) qui contiennent des molécules de groupes assez spécifiques (Cavelan et Togola, 2024, BRGM/RP-73431-FR). Comme indiqué dans ce rapport, la liste des mousses les plus utilisées en France n'est pas disponible à ce jour et demande des investigations supplémentaires. Les premières études disponibles (Dauchy *et al.*, 2019b, 2019a, 2017) identifient des représentants des cinq familles principales appartenant aux groupes des fluorotélomères de thioéther amido sulfonates (molécules du groupe FTSAS ou FtTAoS), des fluorotélomères bétaïnes (groupe des FTBs), des fluorotélomères sulfonamide bétaïnes (groupe des FTSABs ou FTABs), des fluorotélomères thio hydroxyle ammonium (groupe des FtTHNs) et des perfluoroalcanes sulfonamides (groupe des PFASAs).

4. Conclusions

Comme dans le cas de toute autre substance, déterminer des valeurs de fonds en PFAS dans les sols nécessite de définir :

- l'objectif visé par les valeurs de fonds ;
- la stratégie d'échantillonnage adaptée (choix des lieux et de la fréquence des prélèvements, des méthodes de sondage, d'échantillonnage, d'analyse, voire des moyens et des méthodes de conservation des échantillons aux fins de vérification) ;
- les substances pertinentes à cibler ;
- la méthode de détermination des fourchettes basses et surtout hautes des gammes de valeurs de fonds.

Le présent travail de synthèse montre qu'actuellement seuls quelques États ont déterminé des valeurs de fonds en PFAS pour leurs sols afin de permettre une meilleure délimitation des pollutions. Les stratégies sélectionnées diffèrent d'un pays à l'autre selon la volonté d'obtenir une valeur de fonds la plus représentative des milieux naturels (pour délimiter de très faibles niveaux de pollution), une valeur de fonds par usage, ou d'ensemble, prenant en compte toute la diversité des sols du territoire (ex : sols urbains, agricoles, etc.). Ainsi, la stratégie à adopter pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols français devra être adaptée à l'objectif fixé et s'appuyer sur les méthodologies actuellement utilisées pour les polluants organiques et inorganiques des sols.

Les retours d'expériences présentés dans la présente étude bibliographique montrent que l'échantillonnage pour la collecte des données repose bien souvent sur des réseaux déjà existant à l'échelle des territoires concernés. En France, la détermination de valeurs de fonds en PFAS en milieu rural pourrait s'appuyer sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS, 2 240 sites répartis selon une grille de maille carrée de 16 km de côté). L'action 4 (sous-action 8) du plan interministériel PFAS prévoit d'ailleurs d'inclure l'analyse de PFAS dans la campagne RMQS dès 2024 en vue de déterminer des valeurs de fonds. Cependant, ce réseau ne répond pas à l'intégralité des attentes : le réseau ne couvre pas les sols urbains et péri-urbains mais uniquement les sols agricoles. De plus, si l'acquisition de données sur le réseau du RMQS est pertinente pour une discussion à l'échelle régionale ou du territoire, elle ne l'est pas pour une discussion à une échelle plus locale.

Il reste également à définir la stratégie de monitoring à mettre en œuvre dans les sols à prélever, action difficile en raison du manque d'informations sur la nature et les propriétés des PFAS émis par les différents secteurs d'activité présents sur le territoire.

En raison d'un manque de connaissances sur les sources d'émissions en PFAS présents sur leur territoire et des limitations analytiques, les études présentées dans ce rapport n'ont ciblé qu'entre 18 et 39 substances parmi les plus connues, loin des milliers de PFAS composant la famille. Les substances les plus recherchées et quantifiées sont alors les C₄, C₆, C₈ PFASs, les C₄-C₁₂, C₁₄ PFCAs, le PFOSA et le 6:2 FTS. Cependant d'autres substances, pourtant très rarement ciblées, semblent être aussi présentes en grandes concentrations dans certains sols (ex : 6:2 PAP, le FOSAA, 8:2 diPAP). Cela souligne le besoin d'améliorer la connaissance sur les molécules à rechercher, les performances analytiques et de développer des méthodes normalisées (en cours) pour permettre l'acquisition d'un plus large jeu de données. Cela permettrait de caractériser les niveaux d'imprégnation mais aussi la nature des substances poly et perfluorées présentes dans les sols français ; une étape indispensable à l'identification des molécules à cibler pour l'établissement de ces valeurs de fonds.

La capitalisation des données produites par cet exercice doit elle aussi être anticipée. Différentes bases de données existent, que ce soit le RMQS pour les données issues des sites naturels et agricoles ou la base de données BDSoLU pour les milieux urbains et péri-urbains. Le versement des résultats des campagnes d'analyses dans la BdSolU pourrait, par exemple, permettre de capitaliser les données relatives à ces prélèvements et de les intégrer dans les calculs des valeurs de fonds.

Références

- ADEME**, 2018. Guide pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols - échelle d'un territoire. ADEME.
- Belbèze, S.**, 2019. Détermination de FPGA- Fonds Pédo Géochimiques Anthropisés urbains. Agglomération pilote: Toulouse métropole. Rapport Final. (No. BRGM/RP-69502-FR).
- Belbèze, S., Rohmer, J., Négrel, P., Guyonnet, D.**, 2023. Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration* 254, 107298. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107298>.
- Berthou, M., Gérard, V., Pélingre, M., Bagard, A., Batteux, T.L., Losfeld, G.**, 2024. Is it raining PFAS in France? An analysis of 52 PFAS at nanogram per liter levels in French rainwaters during autumn season. *Journal of Environmental Quality* 53, 123–132.
- Biegel-Engler, A., Frauenstein, J.**, 2024. PFAS in Soil and Groundwater: Comprehensive Challenges and Progress in Regulation and Management in Germany, in: Ginzky, H., De Andrade Corrêa, F., Dooley, E., Heuser, I.L., Kameri-Mbote, P., Kibugi, R., Ruppel, O.C. (Eds.), *International Yearbook of Soil Law and Policy 2022*. Springer International Publishing, Cham, pp. 285–304. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40609-6_12.
- BRGM**, 2024a. État des lieux des sources d'émission directes en PFAS. (No. BRGM/RP-73452-FR). BRGM.
- BRGM**, 2024b. État des lieux des substances poly et perfluorées associées à l'utilisation des mousses anti-incendie (AFFF). Rapport final V1 (No. BRGM/RP-73431-FR). BRGM.
- Brusseau, M.L., Anderson, R.H., Guo, B.**, 2020. PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites. *Science of the Total Environment* 740, 140017.
- Cao, X., Wang, Chenchen, Lu, Y., Zhang, M., Khan, K., Song, S., Wang, P., Wang, Cong**, 2019. Occurrence, sources and health risk of polyfluoroalkyl substances (PFASs) in soil, water and sediment from a drinking water source area. *Ecotoxicology and environmental safety* 174, 208–217.
- Chen, S., Jiao, X.-C., Gai, N., Li, X.-J., Wang, X.-C., Lu, G.-H., Piao, H.-T., Rao, Z., Yang, Y.-L.**, 2016. Perfluorinated compounds in soil, surface water, and groundwater from rural areas in eastern China. *Environmental Pollution* 211, 124–131.
- Choi, G.-H., Lee, D.-Y., Jeong, D.-K., Kuppusamy, S., Lee, Y.B., Park, B.-J., Kim, J.-H.**, 2017. Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) concentrations in the South Korean agricultural environment: A national survey. *Journal of integrative agriculture* 16, 1841–1851.
- Dalahmeh, S., Tirgani, S., Komakech, A.J., Niwagaba, C.B., Ahrens, L.**, 2018. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in water, soil and plants in wetlands and agricultural areas in Kampala, Uganda. *Science of the Total Environment* 631, 660–667.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Colin, A., Hemard, J., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2017. Mass flows and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the wastewater treatment plant of a fluorochemical manufacturing facility. *Science of the Total Environment* 576, 549–558.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2019a. Poly- and perfluoroalkyl substances in runoff water and wastewater sampled at a firefighter training area. *Archives of environmental contamination and toxicology* 76, 206–215.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Colin, A., Hémard, J., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F.**, 2019b. Deep seepage of per- and polyfluoroalkyl substances through the soil of a firefighter training site and subsequent groundwater contamination. *Chemosphere* 214, 729–737.
- Healey, M., Driscoll, K., Tepper, R., Heiple, B.**, 2023. Sampling and Analysis Guidance for PFAS at Disposal Sites Regulated under the Massachusetts Contingency Plan (Sampling and Analysis Guidance No. 617-292–5500). Mass - (DEP) Department of Environmental Protection, Boston.

Heimstad, E.S., Nygård, T., Herzke, D., Bohlin-Nizzetto, P., 2018. Environmental pollutants in the terrestrial and urban environment 2017. NILU rapport.

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

Johansson, N., 2023. A general update on how PFAS in soil & groundwater are dealt with in Sweden.

Jolivet, C., Almeida-Falcon, J.L., Berché, P., Boulonne, L., Fontaine, M., Gouny, L., Lehmann, S., Maître, B., Ratié, C., Schellenberger, E., Soler-Dominguez, N., 2018. Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016 - 2027. Version 3 (No. Code EAN : 978 273 801 4160). INRA US 1106 InfoSol, Orléans, France.

Kikuchi, J., Wiberg, K., Stendahl, J., Ahrens, L., 2018. Analysis of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in soil from Swedish background sites.

Kim, E.J., Park, Y.-M., Park, J.-E., Kim, J., 2014. Distributions of new Stockholm convention POPs in soils across South Korea. *Science of the Total Environment* 476, 327–335.

Kim, H., Ekpe, O.D., Lee, J.-H., Kim, D.-H., Oh, J.-E., 2019. Field-scale evaluation of the uptake of Perfluoroalkyl substances from soil by rice in paddy fields in South Korea. *Science of the Total Environment* 671, 714–721.

Lambrecht, M., 2021a. Afleiden van streefwaarden voor perfluorverbindingen en enkele andere 'Emerging Contaminants' – Deel 1.

Lambrecht, M., 2021b. Afleiden van streefwaarden voor perfluorverbindingen en enkele andere 'emerging contaminants'- Deel 2. OVAM.

Maine DEP, 2021. MAINE PFAS SCREENING LEVELS.

Mcintosh, L., Olney, S., Rockwell, C., Campe, L., Duff, C., 2023. PFAS in Massachusetts soils, Establishing background conditions to inform regulatory decision-making.

Naile, J.E., Khim, J.S., Hong, S., Park, J., Kwon, B.-O., Ryu, J.S., Hwang, J.H., Jones, P.D., Giesy, J.P., 2013. Distributions and bioconcentration characteristics of perfluorinated compounds in environmental samples collected from the west coast of Korea. *Chemosphere* 90, 387–394.

Olney, S., Jones, M., Rockwell, C., Collins, R.D., Bryant, J.D., Occhialini, J., 2023. Influence of convective and stratiform precipitation types on per-and polyfluoroalkyl substance concentrations in rain. *Science of The Total Environment* 890, 164051.

OVAM, 2018. Study of the presence of PFAS in groundwater, soil and sediment near risk activities in Flanders.

Rabaey, J., Pancras, T., 2018. Dealing with PFAS in the Netherlands and Belgium.

Rankin, K., Mabury, S.A., Jenkins, T.M., Washington, J.W., 2016. A North American and global survey of perfluoroalkyl substances in surface soils: Distribution patterns and mode of occurrence. *Chemosphere* 161, 333–341.

Reinikainen, J., Tarvainen, T., 2023. National survey on soil background concentrations for PFAS.

Reinikainen, J., Tarvainen, T., Perkola, N., 2024. Suomen maaperän PFAS-pitoisuudet (No. 50401–10013). SYKE, GTK.

Roakes, H., Zemba, S., 2022. Background levels of PFAS and PAHs in Maine shallow soils. (Study Report No. 5060.00). Sanborn, Head and Associates, Inc.

Seo, S.-H., Son, M.-H., Shin, E.-S., Choi, S.-D., Chang, Y.-S., 2019. Matrix-specific distribution and compositional profiles of perfluoroalkyl substances (PFASs) in multimedia environments. *Journal of hazardous materials* 364, 19–27.

SFSE, 2023. Evaluation et gestion des PFAS. Fiches pratiques. Fiche 7 : Bruit de fond : définition et recommandations pour la détermination du bruit de fond.

Söregård, M., Kikuchi, J., Wiberg, K., Ahrens, L., 2022. Spatial distribution and load of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden. *Chemosphere* 295, 133944. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133944>.

Strynar, M.J., Lindstrom, A.B., Nakayama, S.F., Egeghy, P.P., Helfant, L.J., 2012. Pilot scale application of a method for the analysis of perfluorinated compounds in surface soils. *Chemosphere* 86, 252–257.

Tan, B., Wang, T., Wang, P., Luo, W., Lu, Y., Romesh, K.Y., Giesy, J.P., 2014. Perfluoroalkyl substances in soils around the Nepali Koshi River: levels, distribution, and mass balance. *Environmental Science and Pollution Research* 21, 9201–9211.

Touchant, K., Van Holderbeke, M., 2020. Linking Science and policy, deriving threshold levels and standards.

Van Gestel, G., 2023. PFAS in soil and groundwater-Flanders.

Wang, Y., Yu, N., Zhu, X., Guo, H., Jiang, J., Wang, X., Shi, W., Wu, J., Yu, H., Wei, S., 2018. Suspect and nontarget screening of per-and polyfluoroalkyl substances in wastewater from a fluorochemical manufacturing park. *Environmental science & technology* 52, 11007–11016.

Wellnitz, J., Bandow, N., Koschorreck, J., 2023. Long-term trend data for PFAS in soils from German ecosystems, including TOP assay. *Science of The Total Environment* 893, 164586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164586>.

Wintersen, A., Otte, P., 2020. Determination of PFAS limits in soil.

Wintersen, A., Spijker, J., Van Breemen, P., Van Wijnen, H., 2020. Achtergrondwaarden perfluoralkylstoffen (PFAS) in de Nederlands landbodem.

Zhu, W., Roakes, H., Zemba, S., Raju Badireddy, A., 2019. PFAS background in Vermont Shallow soils. Civil and Environmental Engineering University of Vermont.

Annexe 1

Liste des PFAS considérés dans ce rapport

| Substances | Abv. | CAS | Famille | |
|--|---------------|-------------|--|--|
| Acide perfluorobutanoïque | PFBA | 375-22-4 | Acides carboxyliques poly et perfluorés (PFCAs) | |
| Acide perfluoropentanoïque | PFPeA | 2706-90-3 | | |
| Acide perfluorohéxanoïque | PFHxA | 307-24-4 | | |
| Acide perfluorohéptanoïque | PFHpA | 375-85-9 | | |
| Acide perfluorooctanoïque | PFOA | 335-67-1 | | |
| Acide perfluorononanoïque | PFNA | 375-95-1 | | |
| Acide perfluorodécanoïque | PFDA | 335-76-2 | | |
| Acide perfluoroundécanoïque | PFUnDA | 2058-94-8 | | |
| Acide perfluorododécanoïque | PFDoDA | 307-55-1 | | |
| Acide perfluorotridécanoïque | PFTTrDA | 72629-94-8 | | |
| Acide perfluorotétradécanoïque | PFTTeDA | 376-06-7 | | |
| Acide Perfluorohéxadécanoïque | PFHxDA | 67905-19-5 | | |
| Acide perfluorooctadécanoïque | PFODA | 16517-11-6 | | |
| Perfluoro-3,7-diméthyl acide | PF-3,7-DMOA | 172155-07-6 | | |
| 7H-Perfluoroheptanoïque acide | HPFHpA | 1546-95-8 | | |
| Perfluorobutane sulfonate | PFBS | 375-73-5 | Acides sulfoniques poly et perfluorés (PFASs) | |
| Perfluoropentane sulfonate | PFPeS | 2706-91-4 | | |
| Perfluorohexane sulfonate | PFHxS | 355-46-4 | | |
| Perfluoroheptane sulfonate | PFHpS | 375-92-8 | | |
| Perfluorooctane sulfonate | PFOS | 1763-23-1 | | |
| Perfluorononane sulfonate | PFNS | 68259-12-1 | | |
| Perfluorodécane sulfonate | PFDS | 335-77-3 | | |
| Perfluorododécane sulfonate | PFDoS | 79780-39-5 | | |
| Perfluoroundécane sulfonate | PFUnDS | 749786-16-1 | | |
| Perfluorotridécane sulfonate | PFTTrDS | 791563-89-8 | | |
| 1H,1H,2H,2H-perfluorohexanesulfonate | 4:2 FTS | 757124-72-4 | | Fluorotélomères sulfonates (FTSs, FTSAs) |
| 1H,1H,2H,2H-perfluorooctanesulfonate | 6:2 FTS | 27619-97-2 | | |
| 1H,1H,2H,2H-perfluorodécanesulfonate | 8:2 FTS | 39108-34-4 | | |
| 1H,1H,2H,2H-perfluorododécanesulfonate | 10:2 FTS | 120226-60-0 | | |
| 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptadecafluoro-1-octanesulfonamide | PFOSA | 754-91-6 | Perfluoroalcanes sulfonamides (PFASAs) | |
| N-Méthyl perfluorooctane sulfonamide | MePFOSA | 31506-32-8 | | |
| N-Ethyl perfluorooctanesulfonamide | EtPFOSA | 4151-50-2 | | |
| Perfluoro-1-octane sulfonamido acétique acide | FOSAA | 2806-24-8 | Acides acétiques perfluoroalcanes sulfonamides (FASAs) | |
| 2-(N-Méthyl perfluorooctane sulfonamido) acétique acide | MeFOSAA | 2355-31-9 | | |
| Perfluoro-1-butane sulfonamido acétique acide | MeFBSAA | 159381-10-9 | | |
| 2-(N-Ethyl perfluorooctane sulfonamido) acétique acide | EtFOSAA | 2991-50-6 | | |
| N-Méthyl-N-(2-hydroxyéthyl) perfluorooctanesulfonamide | MeFOSE | 24448-09-7 | Perfluoroalcanes sulfonamides éthanol (FASES) | |
| 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8- heptadecafluoro-N-(2- hydroxy éthyl)-N-méthyl-octane-1- sulfonamide | EtFOSE | 1691-99-2 | | |
| Hexafluoropropylène oxide dimer acide (Gen X) | HPFO-DA | 13252-13-6 | Acides carboxyliques poly et perfluorés alkyl éthers (PFECA) | |
| Perfluoro-4-éthylcyclohexane sulfonique acide | PFECHS | 646-83-3 | Acides sulfoniques poly et perfluorés alkyl éthers (PFESAs) | |
| | 6:2 PAP | | Fluorotélomères phosphates (PAPs) | |
| | 8:2 PAP | | | |
| bis(1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl)phosphate | 6:2 diPAP | 57677-95-9 | Fluorotélomères phosphates diesters (diPAPs) | |
| bis(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridécafluoro-1-octanol) hydrogène phosphate | 6:2/8:2 diPAP | 943913-15-3 | | |
| bis(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-heptadécafluorodécyl) hydrogène phosphate | 8:2 diPAP | 678-41-1 | | |
| 4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoïque acide | (A)DONA | 919005-14-4 | | |



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm