



Groupe interministériel «PFAS»

1^{er} Rapport portant sur les travaux réalisés en 2024-2026

11 Mars 2026



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et de la Biodiversité



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de la Santé
et de la Sécurité sociale



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Agriculture,
de l'Alimentation et de la Viticulture

Sommaire

Résumé	3
0. Glossaire	6
1. Introduction	7
2. Contexte	8
3. Description de la situation existante	9
3.1 Santé publique	9
3.1.1 Toxicologie et impact sur la santé	9
3.1.2 Degré d'exposition de la population	9
3.1.3 Eaux potables	10
3.1.4 Denrées alimentaires (à l'exception des eaux minérales et eaux de sources)	13
3.1.4.1 Contrôle officiel	13
3.1.5 Eaux minérales et eaux de source	14
3.2 Milieux naturels	14
3.2.1 Eaux de surface et eaux souterraines	14
3.2.2 Dépôts atmosphériques	15
3.2.3 Sols	16
3.3 Produits chimiques	16
4. Synthèse	18
5. Actions proposées	20
5.1 Approche	20
5.2 Actions prioritaires	20
6. Annexes	22
7. Références	23
Annexes	24
Annexe I- Composition du groupe interministériel	25
Annexe II- Liste des actions recommandées	26
Annexe III- Origine du TFA dans les eaux du Luxembourg. Rapport élaboré par l'Administration de la gestion de l'eau en 2025	46
Annexe IV- Carte des distributions des concentration en TFA dans les réseaux d'approvisionnement public en eau potable	68

Résumé

À la suite de la détection du TFA à large échelle dans les eaux, le ministre de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité a pris l'initiative de constituer de manière informelle **un groupe de travail interministériel « PFAS »**. Il regroupe des représentants du ministère précité, du ministère de la Santé et de la Sécurité Sociale, et du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Viticulture. Bien que la présence de TFA dans les eaux reste une préoccupation prioritaire, la mission du groupe de travail est de suivre de manière rapprochée l'ensemble de la thématique PFAS. Le présent rapport est par conséquent à considérer comme un 1^{er} rapport et d'autres rapports suivront en fonction de l'avancement des travaux du groupe.

Surnommés « **polluants éternels** », les PFAS sont largement utilisés dans **des applications industrielles et grand public**. Ces substances chimiques ultra **persistantes s'accumulent** dans l'environnement et dans l'organisme humain. L'**alimentation** est, d'après des études reconnues, la **principale source d'exposition des citoyens aux PFAS**.

Les multiples sources de pollution entraînent une contamination durable des milieux naturels, y compris des ressources en eau. Les **procédés d'assainissement des sols, d'épuration des eaux souterraines et de traitement de l'eau potable sont souvent inefficaces et coûteux**.

Les **effets néfastes de certains PFAS sur la santé humaine sont multiples** et peuvent inclure des problèmes de thyroïde, une élévation du taux de cholestérol, des effets sur la fertilité, des dommages au foie, des impacts sur le système immunitaire, ainsi qu'une augmentation du risque de certains cancers, en particulier du rein et des testicules.

Une **attention particulière est à porter sur la présence de TFA** dans l'environnement. Des études récentes ont montré la présence de TFA dans 90% des analyses d'échantillons humains. Bien que l'impact du TFA sur la santé ne soit encore peu connu, une **accumulation importante de TFA est constatée dans l'environnement menant à une exposition chronique de la population**.

Le TFA est utilisé à la fois en tant que substance-mère, mais est également le produit de dégradation ultime d'autres PFAS, de gaz réfrigérants, de produits phytopharmaceutiques et biocides. Le TFA est très stable, difficile à dégrader et durable. Sa bonne solubilité dans l'eau lui confère une grande mobilité dans le sol et **une pénétration aisée dans les eaux souterraines**.

Un **certain nombre de démarches et d'interventions ont été prises**, respectivement sont en cours, en vue de limiter l'impact des PFAS sur la santé humaine et le milieu naturel. Parmi elles, les exemples suivants sont à citer :

- Signature de la **Convention de Stockholm** sur les polluants organiques persistants et mise en place de mesures au niveau national comme le renoncement du CGDIS à utiliser des mousses extinctrices comprenant du fluor ;

- Le règlement (UE) 2019/1021 constitue actuellement le texte en vigueur interdisant la mise sur le marché et l'utilisation de trois PFAS : le PFOS, le PFOA et le PFHxS ;

- Amélioration **des méthodes d'analyses**, notamment dans les eaux potables et réalisation de campagnes ciblées ;

- Entrée en vigueur du règlement (UE) 2024/573 établissant des **règles strictes concernant la gestion des gaz fluorés** ;

- Le règlement grand-ducal du 22 juin 2016 règle les **contrôles des équipements de réfrigération**, de climatisation et des pompes à chaleur fonctionnant avec des fluides réfrigérants ;

- Non-renouvellement au niveau européen en 2025 de **l'approbation du flufenacet**, substance active représentant en termes de quantité plus de la moitié des substances actives de type PFAS dans les produits phytopharmaceutiques utilisés au Luxembourg ;

- Installation d'une page FAQ PFAS sur le site www.waasser.lu.

En conclusion à ses travaux, le groupe interministériel propose ainsi 40 actions qui se déclinent autour de 4 axes citées ci-dessous. Ces actions plaident en faveur d'une réduction maximale des expositions, afin de préserver au mieux la santé publique et le milieu naturel.



Axe 1 – Connaissance

Acquérir des **connaissances supplémentaires** sur les sources de pollution et le degré d'exposition aux substances. Evaluation des risques.



Axe 2 – Surveillance

Améliorer et renforcer la **surveillance** tout en mobilisant les données générées pour agir.



Axe 3 – Action

Réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS et mettre en œuvre des mesures de réduction de la pollution.



Axe 4 – Sensibilisation

Mieux **informer** et **sensibiliser** le public.

Une priorisation des actions (priorités 1 à 3) est jugée nécessaire. Les actions prioritaires suivantes sont proposées :

- **Prévention de la pollution** à la source au niveau de l'Union européenne et soutien de l'adoption de mesures strictes dans la législation de l'Union pour protéger la santé ou l'environnement. Les contaminations atmosphériques, voire agricoles ou industrielles, ne trouvant pas leur origine exclusivement au Luxembourg, une action coordonnée initiée par les ministères concernés au niveau européen est primordiale ;

- **Renforcement et développement des campagnes de mesures** (eau, air, sol...) ;

- **Inventaire de l'utilisation des PFAS/TFA** auprès des différents acteurs ;

- Développement d'une **stratégie nationale de bio monitoring** PFAS ;

- Approfondir les **connaissances sur les origines du TFA** ;

- Une **sécurisation de l'approvisionnement en eau potable est primordiale**. Les origines atmosphériques et agricoles du **TFA** mesurées dans les captages d'eau potable sont prédominantes au niveau national. Les **origines industrielles** ne jouent que localement un rôle. En ce qui concerne les **origines**

atmosphériques et agricoles, elles sont multiples et des recherches plus détaillées sont préconisées. L'utilisation de produits phytopharmaceutiques, dont la dégradation dans les sols produit comme métabolite du TFA, est à considérer comme une des origines. Des réductions progressives d'utilisation de ces produits phytopharmaceutiques sont à envisager au moins autour des captages d'eau potable les plus touchés par des concentrations relativement élevées en TFA (> 1 µg/l). Toute limitation d'utilisation doit se faire en considérant au préalable une évaluation d'impact aussi bien sur les conséquences pour la qualité de l'eau potable que pour les pratiques d'utilisation. Il est à considérer que tout remplacement d'un produit par un autre risque d'impacter aussi bien la qualité de l'eau que la sécurité de planification de l'agriculture. Par conséquent, toute limitation de gestion de produits phytopharmaceutiques générant du TFA dans les zones de protection doit se faire de manière holistique, traitant l'ensemble des produits et de leurs métabolites. Cette approche permet de garantir l'efficacité et la crédibilité des mesures prises. Dans ce contexte et en vue de garantir la compétitivité économique, une **stratégie de gestion à long terme concernant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, y compris une réduction progressive de leur impact sur la qualité de l'eau potable**, est à prévoir dans le cadre de la réglementation se rapportant aux zones de protection eaux potables¹. Cette stratégie comprendra un accompagnement rapproché des agriculteurs ;

¹ Règlement grand-ducal du 9 juillet 2013 relatif aux mesures administratives dans l'ensemble des zones de protection pour les masses d'eau souterraines ou parties de masses d'eau souterraines servant de ressource à la production d'eau destinée à la consommation humaine.

- Analyse des possibilités de réduction des **gaz fluorés susceptibles de se dégrader en TFA** au niveau des pompes à chaleur et climatiseurs, y compris la promotion des alternatives qui existent ;

- Poursuite des **travaux de recherche** axés sur les origines des PFAS/TFA dans les milieux naturels ;

- Intensification des campagnes de mesure ciblées auprès des différents acteurs concernés afin d'identifier les sources potentielles de pollution ;

- **Analyse et évaluation des rejets (notamment issus des stations d'épuration)** dans les cours d'eau. Identification d'actions visant à réduire l'utilisation de produits contenant du PFAS (textiles, cosmétiques, jouets...), ainsi qu'à réglementer les rejets de PFAS dans l'environnement ;

- **Campagne de sensibilisation** comprenant communication équilibrée et transparente envers le public ;

- Formalisation du groupe interministériel PFAS **avec notamment l'intégration du ministère de l'Économie. Les travaux à venir se focaliseront sur l'ensemble de la thématique PFAS.**

0. Glossaire

AEV	Administration de l'environnement
AGE	Administration de la gestion de l'eau
ALVA	Administration luxembourgeoise vétérinaire et alimentaire
ASTA	Administration des services techniques de l'agriculture
CGDIS	Corps grand-ducal d'incendie et de secours
DISA	Direction de la santé
ECHA	Agence européenne des produits chimiques
EFSA	Autorité européenne de sécurité des aliments
LNS	Laboratoire national de santé
MAAV	Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Viticulture
MECB	Ministère de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité
MECO	Ministère de l'Économie
MMTP	Ministère de la Mobilité et des Travaux Publics
M3S	Ministère de la Santé et de la Sécurité sociale
REACH	Le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des substances chimiques (REACH), qui fournit un cadre législatif complet pour les substances chimiques fabriquées et utilisées en Europe.
SER	Service d'économie rurale
P&CH	Administration des ponts et chaussées
PFAS	Substances per- ou polyfluoroalkylés
PFHxS	Acide perfluorohexanesulfonique
PFNA	Acide perfluorononanoïque
PFOA	Acide perfluorooctanoïque
PFOS	Acide perfluorooctanesulfonique
TFA	Acide trifluoroacétique

1. Introduction

Les PFAS représentent aujourd'hui un **enjeu majeur pour l'environnement et la santé publique**. Leur présence généralisée dans les milieux naturels et leur persistance soulève de fortes inquiétudes.

Étant donné la multitude des domaines concernés, **un groupe de travail interministériel « PFAS »** s'est constitué de manière informelle à la suite de l'initiative du ministre de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité. Il regroupe des représentants du ministère précité, du ministère de la Santé et de la Sécurité sociale et du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Viticulture, ainsi que des différentes administrations rattachées à ces ministères. La composition détaillée du groupe est jointe en annexe I.

Bien que la présence de TFA dans les eaux ait été identifiée comme une préoccupation prioritaire à la suite des résultats d'analyses disponibles, la mission du groupe de travail est de suivre de manière rapprochée l'ensemble de la thématique PFAS.

Les **objectifs** du groupe de travail sont les suivants :

- Présentation et discussion des résultats de surveillance et des travaux de recherche ;
- Identification des possibles sources d'origine des concentrations mesurées ;
- Évaluation des risques et du degré d'exposition de la population et des écosystèmes ;
- Estimation des impacts des concentrations mesurées notamment sur la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable ;
- Identification de possibles scénarios pour remédier aux concentrations mesurées ;
- Identification de possibles mesures à entreprendre et soumission de ces mesures aux ministres concernés.

Les membres du groupe se sont réunis à **6 reprises**, à savoir le 3 octobre, le 3 décembre 2024, le 18 juin, le 24 septembre, le 13 octobre 2025, et le 5 février 2026.

Le présent rapport résume les travaux du groupe et les conclusions qui ont été tirées pendant cette période. Il sera présenté aux ministres concernés. Ce rapport est à considérer comme un 1^{er} rapport et d'autres rapports suivront en fonction de l'avancement des travaux du groupe.

2. Contexte

Les PFAS sont une **large famille de plusieurs milliers de composés chimiques**. Ces substances ont retenu l'attention en raison de leur **persistance**, de leur potentiel de **bioaccumulation** et de leurs effets potentiels sur les organismes vivants.

Les PFAS étaient et sont encore, pour certaines d'entre elles, largement utilisées **dans des applications industrielles, agricoles et grand public**, notamment dans les revêtements antitaches pour les tissus et les tapis, les revêtements résistants à l'huile pour le papier et le carton, les matériaux en contact avec les aliments, les mousses anti-incendie, les cirages pour les sols, les cosmétiques et les produits phytopharmaceutiques.

Surnommés « **produits chimiques éternels** » en raison de leur stabilité chimique innée, les substances PFAS se sont révélées être des contaminants environnementaux omniprésents, détectés depuis les confins arctiques de la planète jusqu'aux eaux de pluie urbaines. Leur forte mobilité contribue à la contamination des sols et des eaux souterraines, facilitant l'absorption par les cultures et le bétail et, par conséquent, leur entrée dans la chaîne alimentaire humaine.

Selon une étude réalisée en 2020 par l'EFSA, la **principale source d'exposition** des citoyens aux PFAS serait l'**alimentation**. Certaines interventions visant à réduire, respectivement à bannir, **certaines PFAS ont été réalisées au niveau mondial et européen** :

- Le PFOS a été le premier composé inscrit à la **Convention de Stockholm** sur les polluants organiques persistants en 2009, à l'annexe B, qui en autorise l'utilisation restreinte. Une décennie plus tard, en 2019, le PFOA et ses sels ont été ajoutés à l'annexe A, imposant leur élimination mondiale avec certaines exemptions spécifiques. Plus récemment, en 2022, le PFHxS et les composés apparentés ont été inscrits à l'annexe A, cette fois sans exemption, marquant un engagement mondial en faveur de l'élimination complète de leur utilisation. D'autres réglementations concernant les PFAS sont prévues,

la Convention de Stockholm envisageant d'inclure les acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne (C9 - C20), leurs sels et les composés associés. Par ailleurs, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le PFOA comme « peut-être cancérigène pour l'homme ».

- L'Union européenne a adopté la Convention de Stockholm en 2004, et les **initiatives qui en découlent ont été transposées dans la législation européenne** par le règlement (CE) n° 850/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 relatif aux polluants organiques persistants (aujourd'hui abrogé). Le règlement (UE) 2019/1021 constitue actuellement le texte en vigueur. Ce règlement inscrit tous les trois PFAS à l'annexe I, qui répertorie les substances dont la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation sont interdites, à l'exception de certaines dérogations spécifiques prévues pour certains usages essentiels ou limitées dans le temps.

Une attention particulière est à porter à la présence de **TFA** dans l'environnement. Le TFA est un composé **organique carbone-fluor à chaîne courte**. À ce titre, il fait partie des PFAS. Le TFA est utilisé à la fois en tant que substance-mère, mais est également le produit de dégradations ultimes d'autres PFAS, de gaz réfrigérants, de produits phytopharmaceutiques et biocides. Il est utilisé largement dans **l'industrie pharmaceutique** dans la **synthèse des médicaments**, il est employé dans la synthèse de certains pesticides fluorés, et dans d'autres réactions chimiques en industrie. Le TFA est très stable, difficile à dégrader et durable. Sa **bonne solubilité dans l'eau** lui confère une grande mobilité dans le sol et une pénétration aisée dans les eaux souterraines. En raison de l'utilisation généralisée des composés fluorés dans le monde entier et de leur longévité, **le TFA est désormais présent partout dans l'environnement**. On le détecte dans les eaux souterraines, les eaux de pluie, les rivières, les océans, les sols et les plantes.

3. Description de la situation existante

Remarque préliminaire : **L'évolution des connaissances dans ce dossier est très dynamique.** Le présent chapitre reprend les connaissances, regroupées par secteur et qui sont disponibles en date du 15 octobre 2025. La situation se réfère au niveau national tout en faisant référence notamment à des réflexions menées au niveau international.

3.1 Santé publique

3.1.1 Toxicologie et impact sur la santé

Les composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS) suscitent une attention croissante en raison de leur **persistance environnementale, de leur bioaccumulation** et de leurs effets potentiels sur la santé humaine.

Les recherches scientifiques actuelles suggèrent que l'exposition à des niveaux élevés de certains **PFAS peut entraîner des effets néfastes sur la santé**. Ainsi, le PFOS, un produit chimique industriel bien étudié, interfère potentiellement avec le système endocrinien et a des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Des recherches sont toujours en cours pour **déterminer comment différents niveaux d'exposition à différents PFAS peuvent conduire à une variété d'effets sur la santé**. Les scientifiques essaient également de mieux comprendre les effets sur la santé associés à de faibles niveaux d'exposition aux PFAS sur de longues périodes, en particulier chez les enfants.

L'exposition à certains niveaux de **PFAS** peut conduire à :

- Une augmentation du risque de **certains cancers**, y compris les cancers du sein, de la prostate, des reins et des testicules.
- Une réduction de la **capacité du système immunitaire de l'organisme** à combattre les infections, y compris une réponse réduite aux vaccins.
- Une augmentation du **taux de cholestérol et/ou du risque d'obésité, du diabète et des maladies cardiaques**.

○ Des effets sur le **développement neurologique chez les enfants**, notamment un faible poids à la naissance ou des changements de comportement.

○ Des effets sur la **reproduction**, comme une baisse de la fertilité ou une augmentation de l'hypertension artérielle chez les femmes enceintes.

○ Une **interférence avec les hormones naturelles** de l'organisme.

○ Des **perturbations endocriniennes** potentielles.

En ce qui concerne le **TFA**, il existe à ce jour **peu d'études sur sa toxicité éventuelle**. Des études animales indiquent que le foie serait l'organe majoritairement affecté. Des études disponibles indiquent également que le TFA affecterait la reproduction, ce qui a conduit l'agence allemande BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) à déposer fin 2023 auprès de **l'ECHA** (Agence européenne des produits chimiques) **une proposition de classification du TFA comme reprotoxique probable pour l'homme**. Cette proposition est en cours d'instruction au sein de l'ECHA.

Les valeurs toxicologiques du TFA sont également en revue auprès de l'EFSA actuellement. La publication de l'évaluation de risque est prévue pour juillet 2026 (<https://open.efsa.europa.eu/question/EFSA-Q-2024-00502>).

3.1.2 Degré d'exposition de la population

Conformément au principe de précaution, les éléments évoqués ci-dessus plaident **en faveur d'une réduction maximale des expositions**, afin de préserver au mieux la santé publique.

La présence de **PFAS dans l'organisme humain, notamment dans le sang et les urines**, a été mise en évidence par plusieurs études de biosurveillance humaine (HBM), en particulier dans le cadre du programme européen HBM4EU. Ces travaux permettent d'obtenir une vision d'ensemble de l'imprégnation de la population générale par certaines substances chimiques et de mieux évaluer les niveaux d'exposition auxquels la population est soumise. Les résultats de HBM4EU concernant les PFAS ont montré que 14,3% des jeunes (âgés de 12 – 18 ans) avaient des niveaux de PFAS analysés supérieur à la dose hebdomadaire tolérable (DHT) définie par l'EFSA.

En France, dans le cadre de l'étude ESTEBAN, les concentrations sériques de 17 PFAS ont été quantifiées chez des adultes (18-74 ans) et des enfants (6-17 ans). **Le PFOS et le PFOA, ont été retrouvés dans 100% des échantillons.** Des études récentes ont montré la présence de TFA à une fréquence de plus de **90% dans des analyses d'échantillons humains.** Même en l'absence de preuves définitives que le TFA ne présente un risque important pour la santé, sa persistance due à sa stabilité environnementale, combinée avec des émissions constantes ou croissantes, entraîne **une accumulation importante dans l'environnement menant à une exposition chronique de la population.**

L'exposition de la population au PFAS/TFA est généralisée par les aliments, y compris l'eau potable, les produits de consommation, la poussière et l'air.

Au Luxembourg, **aucune étude de biosurveillance humaine représentative n'a été effectuée** jusqu'à présent. Il est prévu que le LNS participe à une nouvelle campagne européenne en vue de mesurer l'accumulation de différentes substances chimiques dans le corps humain (PARC, Partnership for the Assessment of Risks from Chemicals). Dans le cadre de cette étude, des échantillons de 300 enfants seront analysés.

Afin d'obtenir une vue plus globale sur le degré

d'exposition de la population luxembourgeoise aux PFAS en général et au TFA en particulier, il est **indispensable qu'une stratégie de biomonitoring nationale soit développée.** Des campagnes de mesures régulières menées sur des échantillons représentatifs de la population permettent de suivre l'évolution de l'exposition aux substances chimiques au sein des différents groupes de population.

Le biomonitoring est un outil performant pour adapter les politiques de prévention en vue de protéger au mieux la santé de la population.

3.1.3 Eaux potables

La loi du 23 décembre 2022 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (loi « eau potable ») règlemente actuellement la somme des 20 PFAS les plus pertinents (paramètre « **somme PFAS** ») avec une limite de potabilité (valeur paramétrique) fixée à **0,1µg/l**. Cette limite est en vigueur depuis le 12 janvier 2026. À ce paramètre s'ajoute un autre paramètre « total PFAS ». La valeur paramétrique « **total PFAS** » de **0,5µg/l** est entrée en vigueur en date du 7 août 2024, date de publication des lignes directrices techniques pour la surveillance de ce paramètre par la Commission Européenne². Il est à souligner, qu'en cas de dépassement de la valeur paramétrique au niveau d'un point de conformité (robinet d'eau potable), l'eau n'est plus apte à la consommation humaine. Certes la loi « eau potable » prévoit dans son article 15 des dérogations, mais celles-ci sont limitées dans le temps et liées à des conditions exigeantes.

En ce qui concerne les analyses de l'eau potable se rapportant aux paramètres « **somme PFAS** » et « **total PFAS** », **la limite de potabilité n'a jamais été dépassée jusqu'à présent.** La concentration maximale mesurée a atteint 60% de la limite de potabilité à savoir 0,060µg/l. En 2025, les limites de quantification PFAS ont été dépassées à 17 reprises dans les réseaux d'approvisionnement en eau potable (points AEP). Par limite de quantification, on entend une concentration supérieure au signal le plus faible

²Technical guidelines 7.8.2024 [Commission Notice – Technical guidelines regarding methods of analysis for monitoring of per- and polyfluoroalkyl substances \(PFAS\) in water intended for human consumption](#)

d'un instrument d'analyse laboratoire qui permet de déterminer une concentration avec un degré de confiance suffisant.

Actuellement, il n'existe pas de limite de potabilité pour les concentrations de TFA au niveau européen.

En fonction du peu d'informations actuellement disponibles, la Direction de la santé a établi **une valeur d'orientation provisoire de 12µg/l**. Certains pays voisins ont également introduit des valeurs semblables. Celles-ci varient significativement en fonction de la méthodologie utilisée³. La valeur d'orientation n'entraîne aucune conséquence en ce qui concerne la consommation de l'eau du robinet. Elle incite à prendre des mesures pour réduire les concentrations au niveau des ressources d'eau potable (lac de la Haute-Sûre, captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine).

Il est important de souligner qu'il est tout à fait possible que **ces valeurs provisoires soient significativement revues à la baisse** au niveau européen (voir également chapitre 3.2.1).

Des demandes de reclassification du degré de toxicité de TFA ont été introduites auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA). Si la présence de TFA dans les eaux souterraines est causée par la métabolisation de substances actives contenues dans des produits phytopharmaceutiques, une valeur limite européenne de 0,1 µg/l⁴ serait à considérer en application des lignes directrices européennes dans ce domaine, ce qui peut entraîner des conséquences sur la mise sur le marché de ces substances actives et produits phytopharmaceutiques. Ceci aurait comme conséquence que toute eau du robinet avec une concentration en TFA supérieure à 0,1 µg/l, soit 120 fois inférieure par rapport à la valeur d'orientation actuelle, ne serait plus apte à la consommation humaine.

Les résultats les plus récents⁵ obtenus par l'AGE indiquent des concentrations de TFA dans les **réseaux d'eaux potables** du Luxembourg qui varient

entre **0,087 et 2,5 µg/l** (valeur moyenne : 0,85 µg/l, valeur médiane : **0,90 µg/l**). Au niveau des captages d'eau potable, les forages captant l'eau dans des aquifères à plus grande profondeur renfermant de l'eau relativement « âgée » présentent les plus basses concentrations.

Une **carte des distributions des concentrations de TFA dans les réseaux d'approvisionnement public en eau potable** est jointe en annexe IV. Une tendance à des concentrations plus élevées est constatée dans des communes rurales disposant leurs propres captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Les technologies disponibles pour éliminer le TFA des eaux potables sont similaires à celles utilisées pour le dessalement de l'eau de mer (traitement par osmose inverse). La **décentralisation de l'alimentation en eau potable**, qui dépend notamment d'environ 310 captages, engendre qu'il **n'est pas faisable de réaliser ces traitements pour éliminer le TFA à large échelle**. Ceci d'autant plus que les besoins en eau potable cessent d'accroître et que des **pénuries en eau potable sont possibles en périodes de consommation de pointe à l'horizon 2040**. Le traitement par osmose inverse engendre des pertes d'eau de **20-30 %**, pertes qui renforceraient les risques de **pénuries**. Ces traitements engendreraient également **l'augmentation significative des prix de l'eau**.

Les pistes identifiées en vue de garantir une sécurité d'approvisionnement en eau potable (protection de la qualité de l'eau, économies en eau, exploitation de nouvelles ressources et interconnexion des réseaux, plans d'urgence...) seront élucidées dans la stratégie pour la résilience dans le domaine de l'eau qui sera élaborée d'ici la fin du 1^{er} semestre 2026. Cette stratégie fera de son côté partie de la stratégie nationale de résilience (« LëtZ Prepare ! »). Il est opportun d'y aborder également la thématique PFAS/TFA qui est également considérée dans la stratégie européenne pour la résilience dans le domaine de l'eau⁶.

³Tandis que les Pays Bas ont fixé une valeur guide de 2,2 µg/l pour le TFA, celle-ci est de 60 µg/l en Allemagne.

⁴En application du document guide SANCO/221/2000 le TFA est à considérer comme métabolite pertinent d'un produit phytopharmaceutique.

En application de l'annexe I de la loi « eau potable » une limite de potabilité de 0,1 µg/l serait dès lors de vigueur.

⁵Résultats disponibles au 1^{er} février 2026.

⁶[Stratégie pour la résilience dans le domaine de l'eau - Commission européenne](#)

En cas de dépassements des valeurs limites pour des polluants émergents, la loi « eau potable » prévoit **des dérogations de fourniture de l'eau potable sur 6 ans au maximum**. C'est-à-dire au plus tard 6 ans après l'application des valeurs limites, les installations de traitement des eaux potables doivent être opérationnelles. Les temps de séjour des eaux dans les couches géologiques dépassent souvent quelques dizaines d'années. Par conséquent, et en tenant compte des propriétés moléculaires du TFA, sa présence dans les eaux potables dépassera l'échéance de 6 ans.

Par conséquent, une amélioration de la situation n'est pas à espérer sans **l'implantation de mesures préventives dans les zones de protection d'eau potable**.

En vue de mettre en œuvre des mesures préventives efficaces dans les zones de protection des eaux potables, il **est important de comprendre les origines du TFA** omniprésent dans les captages d'eau potable, que ce soit au niveau des captages d'eau souterraine (sources, forages) ou encore au niveau du barrage du lac de la Haute Sûre.

Le TFA est un produit de dégradation avéré de nombreux gaz fluorés utilisés dans diverses applications, notamment dans la réfrigération. Sous l'effet des rayons ultraviolets, les gaz fluorés se transforment en TFA qui retombe ensuite sur les sols et les cours d'eau sous forme de précipitations. La concentration actuelle de TFA dans les eaux de pluie oscille entre 0,5 et 0,8 µg/l.

L'eau de pluie chargée en TFA ruisselle vers les cours d'eau ou s'infiltre au niveau des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine. Sur son chemin vers ces captages, la **concentration de TFA présente dans l'eau de pluie peut être augmentée par le lessivage de TFA issu de différentes applications en surface**. Les **infiltrations vers les eaux souterraines se font dans la plupart des cas de manière diffuse**. Des **infiltrations préférentielles sont également possibles**. Localement, des infiltrations ponctuelles

et directes d'eau de surface vers l'eau souterraine se font à travers des zones fracturées dans la roche (par exemple par l'infiltration de cours d'eau). Ces périmètres d'infiltration préférentielle sont classés en zones de protection rapprochée à risque élevé (zone II-V1). Ces **zones II-V1 représentent environ 1%** des surfaces totales délimitées comme zone de protection autour des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine.

Une étude réalisée par l'AGE et qui est jointe en annexe III du présent rapport a mis en évidence que **les dépôts atmosphériques sont à l'origine d'une concentration de fond représentant entre 50% et 70%** de la contamination des eaux potables en TFA.

Dans les zones de protection eaux potables, la **contamination restante s'explique par des infiltrations diffuses dans les zones d'alimentation**. Les terres arables y représentent **environ 20% de l'occupation du sol, les prairies permanentes également 20%** alors que les **zones urbaines/industrielles représentent moins de 5%**. Des zones industrielles ne sont situées que localement dans les zones de protection d'eau potable⁷. Par conséquent, en considérant que les concentrations mesurées au niveau des captages d'eau potable qui sont significativement supérieures à 0,8 µg/l, une origine agricole notable est à considérer au niveau des zones de protection eaux potables.

Cette hypothèse est renforcée par le rapport de l'AGE (annexe III) ainsi que par des concentrations relativement élevées dans les réseaux de distribution eaux potables dans la région du Mullerthal (annexe IV). Cette région possède la particularité, contrairement à d'autres régions de ne pas être connectée à un syndicat communal d'envergure régionale. Les communes sont approvisionnées par des captages d'eau potable locaux. L'occupation du sol dans les zones de protection de la région de Mullerthal est dominée par l'agriculture, alors que la présence de l'industrie n'est pas significative.

⁷Zones de protection délimitées autour des captages d'eau souterraine Trudlerbour, Millbech, Stuwelsboesch, Boumillen nouvelle, B11 et Bichel, ainsi que du site de captage Scheidhof situées sur les territoires des communes de Contern, Hesperange, Luxembourg, Sandweiler, Schuttrange et Weiler-la-Tour.

Les **sources agricoles exactes restent encore incertaines**. Néanmoins, l'application de produits phytopharmaceutiques PFAS, est à considérer comme une source très vraisemblable de contamination en zones de protection eaux potables.

Outre la contribution agricole, des contributions par des infiltrations préférentielles à la suite **de rejets industriels** ou encore des rejets par des stations d'épuration ne sont pas à exclure de manière isolée et au **niveau local**. Ces apports sont plus notables dans les eaux de surface et eaux souterraines **en dehors** des zones de protection eaux potables.

Les concentrations de TFA mesurées **au niveau du barrage du Lac de la Haute Sûre oscillent actuellement autour de 1,3 µg/l**. Des concentrations mesurées dans les différents bassins tributaires atteignent une grandeur d'ordre de 1,5µg/l. A noter, qu'une première analyse met en évidence que les bassins marqués par un impact significatif des eaux usées⁸ ne présentent pas les concentrations les plus élevées en TFA.

La présence du TFA ne se limite pas à l'eau du robinet, mais concerne également **l'eau embouteillée** (eaux minérales et eaux de source) (voir chapitre 3.1.4).

3.1.4 Denrées alimentaires (à l'exception des eaux minérales et eaux de sources)

Dans le domaine **des denrées alimentaires**, l'**EFSA** a établi en 2018 des valeurs d'apport hebdomadaire tolérable (TWI) de 13 ng/kg de poids corporel (pc)/semaine pour le PFOS et de 6 ng/kg pc/semaine pour le **PFOA**. La TWI correspond à la quantité hebdomadaire estimée d'une substance pouvant être consommée tout au long de la vie sans risque notable pour la santé. En 2020, l'EFSA a révisé cette valeur à 4,4 ng/kg pc/semaine pour la **somme du PFOA, du PFNA, du PFHxS et du PFOS**. En conséquence, le règlement (UE) 2023/915 de la Commission fixe des limites maximales pour ces substances dans certains produits d'origine animale.

La recommandation (UE) 2022/1431 de la Commission invite **les États membres à surveiller les niveaux de PFAS dans les denrées alimentaires d'origine non animale** et, en cas de dépassement des niveaux indicatifs, à mener des **investigations complémentaires sur la cause de la contamination**.

3.1.4.1 Contrôle officiel

Les **quatre PFAS** pour lesquels il existe des limites dans le règlement (UE) 2023/915 et qui sont couverts par la recommandation (UE) 2022/1431 de la Commission **ont été analysés dans une grande variété de denrées alimentaires**. Le **TFA ne faisait pas partie des paramètres pris en compte**.

Un total de 204 échantillons a été collecté au Luxembourg sur une période de trois ans, de 2022 à 2024. Parmi ces échantillons, **108 (52,9 %) étaient d'origine luxembourgeoise, 68 (33,3 %) provenaient de productions au sein de l'Union européenne**, 6 (2,9 %) étaient issus de sources mixtes (UE/hors UE), 15 (7,4 %) provenaient de pays tiers (hors UE) et 8 (3,9 %) étaient d'origine inconnue.

Les échantillons comprenaient des **denrées d'origine animale** (78 échantillons, soit 38,2 %) et **d'origine non animale** (126 échantillons, soit 61,8 %).

Un total de **75 détections** a été observé dans **48 échantillons** : PFOA (35 fois), PFOS (25 fois), PFHxS (8 fois) et PFNA (7 fois).

Concernant les produits d'origine non animale luxembourgeois, **un échantillon de concombre et six échantillons de pommes de terre démontraient une présence de PFAS**. Dans un cas, la valeur indicative de la recommandation (UE) 2022/1431 de la Commission européenne a été dépassée. Une enquête plus approfondie sur les causes de la contamination doit être menée en cas de dépassement de cette valeur indicative.

En ce qui concerne les denrées alimentaires d'origine animale, deux échantillons de lait, un échantillon de viande de poulet, un échantillon de jambon cuit, un

⁸Bilsdrëfferbaach, Syrbaach, Sûre Martelange, Sûre Rommelerhaff, Béiwenerbaach suivant les informations mises à disposition par le SEBES.

échantillon de miel, six produits de chasse à base de marcassin ainsi que plusieurs échantillons de viande de marcassin présentaient des détections de PFAS. **Toutefois, l'ensemble des produits analysés était conforme aux limites maximales fixées par le règlement (UE) 2023/915 de la Commission.**

Des informations détaillées des contrôles officiels effectués peuvent être consultées via le site internet : <https://securite-alimentaire.public.lu/fr/publications/fiches/pfas.html>.

Des études réalisées au niveau international montrent la présence de **TFA notamment dans la bière et le vin**. Des analyses sur des échantillons de vins réalisées par l'université de Freiburg (D) ont mis en évidence des concentrations significativement supérieures à celles détectées dans l'eau (voir chapitre 3.1.3).

3.1.5 Eaux minérales et eaux de source

Ces eaux sont **contrôlées de manière récurrente par l'ALVA**.

En 2024 et 2025, les eaux minérales naturelles et de sources luxembourgeoises ont été analysées en reprenant, entre autres, les PFAS. Sur les 57 échantillons, un seul présentait des traces en PFAS (0,002 µg/L pour la somme).

En 2025, les **30 échantillons eaux minérales et eaux de sources** ont également été analysés sur la présence en TFA. Les valeurs se situent entre **0,025 µg/l (limite de détection) et 0,839 µg/l, avec une moyenne de 0,297 µg/l**.

3.2 Milieux naturels

3.2.1 Eaux de surface et eaux souterraines

Les **normes de qualité environnementales de ces eaux sont fixées dans des règlements grand-ducaux** qui transposent des directives spécifiques aux eaux de surface (2008/105/EC, 2013/39/UE) et aux eaux souterraines (2006/118/EC). Ces normes ne sont pas forcément identiques aux normes de potabilité car elles sont également basées sur des critères d'écotoxicité et visent à protéger l'environnement naturel. Le **non-respect de ces normes peut notamment représenter un danger vital pour les organismes vivant dans et autour des cours d'eau**.

Actuellement, une mise à jour de ces directives est en discussion, un accord a été trouvé entre la Commission, le Conseil et le Parlement européen (la publication des directives est prévue pour fin mars 2026). Dans ces directives, le spectre de la famille des PFAS est élargi pour les **eaux de surface** en incluant une valeur seuil pour la somme de 24 substances y compris **le TFA avec un facteur de pondération adapté**. En ce qui concerne les eaux souterraines, il est jugé prématuré de définir une norme de qualité environnementale spécifique pour le TFA. Par contre, une norme est à introduire lors d'une future révision, sur base des connaissances scientifiques les plus récentes, tout en tenant également compte des travaux actuellement menés par l'EFSA et l'OMS.

Les concentrations en TFA mesurées par l'AGE dans les **eaux de surface sont en moyenne de 1,29 µg/l avec une concentration maximale de 14,0 µg/l⁹**.

Pour les eaux souterraines la concentration moyenne est de 1,08 µg TFA/l avec une concentration maximale quantifiée de 7,7 µg TFA/l⁹.

En ce qui **concerne les origines possibles, les mêmes hypothèses que pour les eaux potables sont de vigueur**. Cependant les apports en provenance des

⁹Résultats disponibles au 1^{er} février 2026.

rejets industriels et des stations d'épuration des eaux usées peuvent être plus importants en dehors des zones de protection des eaux potables.

3.2.2 Dépôts atmosphériques

L'apport de TFA provenant de la **dégradation atmosphérique de composés fluorés volatils, comme les gaz réfrigérants**, est considéré, en l'état actuel des connaissances, comme une des **principales sources diffuses de TFA pour l'environnement non marin** (18). Les dépôts humides et secs de TFA entraînent un apport global de TFA dans divers compartiments de l'environnement, même dans les régions éloignées comme l'Antarctique où l'activité anthropique est très faible.

On peut supposer avec une très grande probabilité que **l'apport en TFA par les précipitations va augmenter globalement et ceci à court terme**. L'évolution à long terme reste incertaine et dépend de l'entrée en vigueur des différentes régulations. Les agents frigorigènes et les agents moussants halogénés jouent ici un rôle déterminant. La réglementation européenne pertinente vise à éliminer la plupart de ces agents problématiques d'ici à 2050.

Les **sources d'émissions des gaz fluorés** sont multiples (systèmes de climatisation, pompes à chaleur à échelle domestique et industrielle), la **production est réalisée à l'étranger, tandis que la distribution et l'utilisation s'effectuent aux niveaux national et international**. Compte tenu du caractère ubiquitaire des gaz fluorés et de leur capacité de transport à longue distance, les immissions, résultant à la fois des émissions nationales et transfrontalières, sont évaluées comme étant sensiblement supérieures aux émissions strictement domestiques. Suivant le rapport LU-National Emission Inventory Report¹⁰ se rapportant aux émissions de gaz à effet de serre, la source principale d'émission des gaz fluorés sont les climatisations mobiles (Mobile Air Conditioning, MAC) et en particulier les climatisations de voitures. Ces émissions dépassent d'un facteur 10, les émissions en provenance des installations

de réfrigération et climatisations fixes (Stationary Refrigeration and Air Conditioning, stat.RAC).

Dans l'UE, les **gaz fluorés sont encadrés par le règlement (UE) 2024/573** relatif aux gaz à effet de serre fluorés, qui établit des règles strictes concernant leur gestion, incluant le confinement, l'utilisation, le recyclage, la régénération et la destruction, ainsi que la certification et la formation à leur manipulation. Ce **règlement impose des conditions à leur production, commercialisation et utilisation, fixe des limites quantitatives et définit des obligations de déclaration**. Il vise à prévenir les émissions de gaz fluorés dans l'atmosphère et à éliminer progressivement les gaz fluorés à effet de serre d'ici 2050. Il est à noter que pour les climatisations mobiles de voitures, aucune solution alternative n'existe à l'heure actuelle.

Au niveau national, le **règlement grand-ducal du 22 juin 2016 complète la réglementation européenne en imposant que tout équipement de réfrigération**, tel que les climatiseurs et les pompes à chaleur, soit réceptionné par la Chambre des Métiers.

L'industrie développe **activement des technologies utilisant des gaz naturels comme alternatives écologiques**, certaines de ces technologies commençant à être disponibles sur le marché. Cependant, il convient de souligner que les gaz naturels intégrés dans ces nouvelles technologies présentent des risques alternatifs, plus immédiats, qui doivent être pris en compte, notamment leur inflammabilité et la nécessité d'exploiter les systèmes sous haute pression.

En ce qui concerne les concentrations de TFA dans les eaux pluviales, il n'existe à l'heure actuelle pas encore de données au Luxembourg. Il est estimé que **ces concentrations se situent à peu près entre 0,5 à 0,8 µg/l** (voir annexe III). En ligne avec la dispersion globale des dépôts atmosphériques, ces concentrations se trouvent **dans le même ordre de grandeur que les concentrations mesurées en Allemagne**. Afin de vérifier ces estimations, une première campagne de mesure est planifiée pour 2026.

¹⁰<https://unfccc.int/documents/645242> (page 281)

Afin d'acquérir des connaissances supplémentaires sur la présence des PFAS dans l'air, il est prévu **d'intégrer certaines PFAS au programme de biosurveillance de l'AEV** portant sur les mousses terrestres et les légumes à feuilles. Les choux verts à feuilles polylobées (espèce *Brassica oleracea*) ont l'avantage de posséder une surface importante pour capter des poussières transportées par voie aérienne. Ces particules ne peuvent être éliminées que partiellement, que ce soit par le lavage à l'eau de pluie ou un rinçage avant consommation. Les mousses terrestres ont la faculté de fixer et d'accumuler les contaminants qui se déposent au sol à partir de la colonne d'air. Le réseau de biosurveillance comporte actuellement entre 5 (choux verts) et 13 (mousses) sites d'observation pour le contrôle jugé prioritaire des valeurs de concentrations de certains polluants.

3.2.3 Sols

La présence de **PFAS à longue chaîne moléculaire est problématique pour les sols**. Ceux-ci peuvent se trouver dans les sols sous forme de pollution diffuse aussi bien que sous forme de pollution locale liée à des sites contaminés.

En considérant la **mobilité du TFA au niveau du compartiment « sol », sa présence y est nettement moins problématique**. En effet, il ne s'accumule pas dans le sol¹¹.

L'AEV a lancé en 2025 une **campagne à échelle nationale** en vue de mesurer les concentrations de fond dans les **sols pour 20 PFAS** identifiés au préalable. Cette campagne s'étendra sur trois ans. Le TFA, pour les raisons expliquées dans le point ci-dessus, ne fait pas partie de cette campagne.

3.3 Produits chimiques

Au niveau européen, **quelques substances de la famille des PFAS font d'ores et déjà l'objet d'interdictions** dues à leur toxicité et à leur potentiel cancérigène prouvé.

La **conformité des produits pertinents est régulièrement contrôlée**. En cas de non-conformités, comme récemment dans le secteur cosmétique, celles-ci sont adressées de manière appropriée.

En 2023, dans le cadre de la réglementation européenne **REACH**, un **consortium de cinq pays a déposé auprès de l'ECHA un projet visant à restreindre complètement la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation de PFAS**¹². Ce projet propose de traiter les PFAS en tant que famille de molécules et de restreindre l'utilisation et la production de toute la famille et non uniquement de substances individuelles. Cette proposition de restriction implique la présentation d'un dossier justifiant scientifiquement cette mesure tout en tenant compte de l'impact socio-économique. Actuellement, ce projet de restriction est en cours de révision après la consultation publique obligatoire.

Le **projet de restriction européenne susmentionné ne vise pas les produits phytopharmaceutiques et biocides**, étant donné que ceux-ci sont déjà encadrés par des règlements européens spécifiques.

Grâce à des restrictions générales, qui ne ciblent pas spécifiquement les PFAS, la **réglementation communautaire sur les produits biocides exclut la majorité de ces substances du marché européen**. Sur le marché luxembourgeois, il n'existe que quelques produits biocides contenant l'une des trois substances actives¹³ classées comme PFAS¹⁴ : Lambda-cyhalothrine, Chlorfénapyr et Flocoumafène. Ces substances se retrouvent dans trois types de produits : sprays & poudres contre les fourmis, appâts adhésifs

¹¹CLH report: Proposal for Harmonised Classification and Labelling of TFA- Section 11.4.2.1 Soil Adsorption/desorption studies

¹²Projet de restriction des substances PFAS sur le marché européen

¹³Substance d'un produit biocide exerçant l'action contre les organismes nuisibles.

¹⁴Background Document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), Annex A

pour mouches destinés aux fenêtres, et poison contre les rats. Le mode d'utilisation de ces produits limite l'exposition de l'environnement et, compte tenu de l'existence de produits alternatifs, les émissions liées à l'usage de ces biocides devraient être secondaires.

La **réglementation européenne régit l'approbation des substances actives contenues dans les produits phytopharmaceutiques**. De la même manière que pour les produits biocides, les critères d'approbation des substances actives de produits phytopharmaceutiques n'excluent pour l'instant pas directement celles considérées comme PFAS. Cependant le cadre légal permet aux États membres de limiter l'utilisation ou d'interdire la mise sur le marché d'un produit phytopharmaceutique au niveau national lorsque celui-ci représente un risque inacceptable pour l'environnement ou la santé humaine.

Au Luxembourg, les **informations disponibles sur les entreprises industrielles qui produisent ou utilisent du TFA ou des précurseurs de TFA présentent des lacunes bien trop importantes**. Il en est de même des données sur les quantités rejetées dans le milieu aquatique du fait de ces activités industrielles

En ce qui concerne les **données d'utilisation de produits phytopharmaceutiques**, les chiffres d'utilisation agricole au niveau national sont publiquement accessibles¹⁵. Dans les zones de protection en eau potable, des échanges de données au niveau parcellaire ont eu lieu dans le cadre de conventions de coopération entre les fournisseurs d'eau potable et les exploitants agricoles.

¹⁵[Utilisation de produits phytopharmaceutiques dans l'agriculture et la viticulture et différenciation des „big movers“ - Landwirtschaftsportal- Luxembourg](#)

4. Synthèse

Malgré les connaissances détaillées sur un nombre limité de PFAS (PFOA, PFOS, ...) les normes toxicologiques au niveau international concernant toute la famille de PFAS sont actuellement insuffisantes et en évolution constante.

Au Luxembourg, les **informations sur la présence** aussi bien des PFAS en général que du TFA en particulier dans les milieux naturels, les aliments et les corps humains **sont dans une phase précoce**. Les **connaissances sur les origines et sur les transferts entre les différents milieux restent vagues, dues à une surveillance insuffisante à ce jour**. Ce manque d'information se traduit par une **sensibilisation lacunaire du public et des professionnels**. Ce dernier aspect est susceptible de générer des incertitudes, voire des méfiances. Ceci d'autant plus que la présence de ces substances hautement persistantes risque de perdurer et de s'amplifier si rien n'est fait.

Un certain nombre de démarches et mesures ont été prises, respectivement sont en cours, en vue de limiter l'impact des PFAS sur la santé humaine et le milieu naturel, dont notamment :

- La signature de la **Convention de Stockholm** sur les polluants organiques persistants et la mise en place de mesures au niveau national comme le **renoncement depuis 2019 du CGDIS** à utiliser des mousses extinctrices comprenant du fluor ;

- L'entrée en vigueur du règlement (UE) 2024/573 établissant des **règles strictes concernant la gestion des gaz fluorés** ;

- Le règlement grand-ducal du 22 juin 2016 règle les **contrôles des équipements de réfrigération**, de climatisation et des pompes à chaleur fonctionnant avec des fluides réfrigérants ;

- Le non-renouvellement en 2025 au niveau européen de **l'approbation du flufenacet**, substance active représentant en termes de quantité plus de la moitié des substances actives de type PFAS dans les produits phytopharmaceutiques utilisés au Luxembourg ;

- Le **développement de méthodes d'analyses agréées de la qualité de l'eau** au sein du laboratoire de l'AGE ;

- La réalisation de **campagnes de mesures ciblées** dans les **eaux** potables, les eaux souterraines, les eaux de surface, ainsi que les eaux embouteillées ;

- L'installation d'une **page FAQ PFAS** sur le site www.waasser.lu ;

- La rédaction d'un **rapport par l'AGE sur l'origine du TFA dans les eaux du Luxembourg** (voir annexe III) ;

- Le développement d'un **outil par l'AGE permettant de réaliser une analyse de risques** des produits phytopharmaceutiques dans les zones de protection des eaux potables ;

- La création d'un groupe de travail regroupant des experts des domaines de l'eau potable et de l'agriculture visant à réduire les risques de contamination des eaux potables par des produits phytopharmaceutiques ;

- L'établissement et la mise en œuvre de programmes de mesures dans les zones de protection, y compris des mesures visant à réduire respectivement à renoncer à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (projets pilotes, mesures agroenvironnementales, conseil agricole, sensibilisation de commerçants, inventaire au niveau d'une zone industrielle) ;

- La stratégie visant à réduire l'utilisation de produits phytopharmaceutiques ;

- L'interdiction au niveau international de différents PFAS.

Pour remédier à la problématique des PFAS de manière globale et de manière efficace, des mesures doivent également être prises **à l'échelle internationale**. Les chaînes de production ne se situent pas au niveau national et la très grande majorité des apports possède des origines transfrontalières qui sont

liées à des importations commerciales. Il en est de même avec les apports du TFA par des dépôts atmosphériques. **Des interventions au niveau international sont indispensables** pour limiter au plus vite la pollution de l'environnement par des substances ultra-persistantes potentiellement nocives. Il est proposé que le Luxembourg continue de soutenir la proposition de restriction large des PFAS introduite dans le cadre de REACH.

En ce qui concerne la présence de **TFA dans les eaux potables luxembourgeoises**, les dépôts atmosphériques sont à l'origine d'une concentration de fond estimée entre 50% et 70% de la contamination suivant une étude réalisée par l'AGE (voir annexe III). **La concentration de TFA présente dans l'eau de pluie peut être augmentée par le lessivage de TFA issus de différentes applications en surface.** Les infiltrations vers les **eaux souterraines** se font dans la plus grande partie de manière diffuse. Les terres arables et les prairies occupent par rapport aux zones industrielles/urbanisées, les surfaces les plus significatives dans les zones de protection. Par conséquent, la contribution agricole est à considérer prioritairement à large échelle. Les rejets industriels et en provenance des stations d'épuration des eaux usées jouent un rôle subordonné au niveau local.

Le constat est similaire pour les **zones de protection des eaux potables** délimitées autour du lac de la Haute-Sûre. Les sources agricoles exactes restent encore indéterminées. Néanmoins, l'application à doses substantielles de produits phytopharmaceutiques fluorés dans le cycle de cultivation de certaines cultures, notamment des cultures céréalières d'hiver, est identifiée comme une source très vraisemblable.

Des mesures d'atténuation à échelle nationale doivent faire partie intégrante, **en application du principe de précaution, d'une stratégie de minimisation des apports.** Cette stratégie préventive doit considérer les **particularités nationales** comme la décentralisation de l'alimentation de l'eau potable couplée à la non-faisabilité des traitements curatifs de l'eau chargée en TFA. La mise en danger de la

sécurité d'approvisionnement en eau potable mettra également en péril l'essor économique du pays.

En vue de la complexité de l'enjeu pour la santé publique et de l'environnement qui implique une **multitude de domaines**, de futures actions sont à mener de **manière concertée et prioritaire.** Ceci en l'occurrence en considérant les enjeux de compétitivité économique pour certains secteurs comme l'agriculture ou encore l'industrie.

5. Actions proposées

5.1 Approche

Le groupe interministériel « PFAS » a identifié **40 actions** qui s'articulent autour des 4 axes suivantes :



Axe 1 – Connaissance

Acquérir des **connaissances supplémentaires** sur les sources de pollution et le degré d'exposition aux substances. Evaluation des risques.



Axe 2 – Surveillance

Améliorer et renforcer la **surveillance** tout en mobilisant les données générées pour agir.



Axe 3 – Action

Réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS et mettre en œuvre des mesures de réduction de la pollution.



Axe 4 – Sensibilisation

Mieux **informer** et **sensibiliser** le public.

5.2 Actions prioritaires

Dans la plupart des cas, des actions ciblées pour réduire les risques d'exposition ne peuvent être menées que lorsque les autorités disposeront de plus amples données, respectivement de connaissances. C'est pour cette raison qu'une **priorisation des sous-actions est proposée**.

En priorité, le **renforcement des campagnes de mesure de l'eau potable** est à viser, y compris l'eau embouteillée (A.1), ceci en vue de pouvoir disposer de connaissances supplémentaires pour mettre en place des mesures préventives dans les zones de protection eaux potables (A.2).

Une **priorité est la réduction de la présence de TFA** au niveau des dépôts atmosphériques qui contribuent significativement à la présence du TFA dans les milieux naturels. Des actions prioritaires sont à mener aux niveaux national et international en vue de réduire les apports, ceci notamment par le développement d'une stratégie visant une **limitation/réduction de gaz fluorés** (actions A7.1, A9.1).

Les origines du **TFA ne sont pas encore complètement connues et des incertitudes demeurent**. En considération des connaissances actuelles, des **priorités sont à donner à l'eau potable et en particulier aux dépôts atmosphériques et aux intrants agricoles**. Des travaux de recherche permettant de donner des clarifications sur les origines du TFA sont à entamer le plus rapidement possible (A2.1).

Le Danemark et la Finlande¹⁶ **ont interdit l'utilisation de produits phytopharmaceutiques générant du TFA en vue de protéger la qualité de l'eau**. Bien que le Danemark soit un des seuls pays à avoir, à ce jour, imposé une interdiction nationale aussi large et décisive des produits spécifiques, son action a clairement catalysé des mesures et des discussions réglementaires dans d'autres pays et au sein de l'UE.

L'UE interdit déjà des pesticides spécifiques qui génèrent du TFA (comme le flufénacet), et les procédures pour des restrictions plus larges des produits phytopharmaceutiques PFAS sont en cours via l'ECHA, incluant des dérogations pour certaines utilisations. Des pays comme l'Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas, la Suède et la Norvège

¹⁶List of products withdrawn due to formation of TFA from the active substance and periods of grace, Miljøstyrelsen • Tolderlundsvej 5 • 5000 Odense, www.mst.dk, July 16th, 2025.

sont moteurs de cette initiative, visant à restreindre l'ensemble des PFAS, reconnaissant la présence de TFA dans l'eau et ses risques.

Étant donné les temps de séjours prolongés des substances dans les eaux souterraines et étant donné l'insécurité des évolutions des connaissances scientifiques du TFA, les membres du groupe de travail préconisent par application du **principe de précaution, une réduction progressive d'utilisation des substances susceptibles de générer du TFA** au niveau des zones de protection eaux potables dans lesquelles des concentrations significatives ($> 1 \mu\text{g/l}$) ont été mesurées dans les eaux de captage (A.2.2). Il est à considérer que tout remplacement d'un produit par un autre risque d'impacter aussi bien la qualité de l'eau que la sécurité de planification de l'agriculture. Par conséquent, toute limitation de gestion de produits phytopharmaceutiques générant du TFA dans les zones de protection doit se faire de manière holistique, traitant l'ensemble des produits et de leurs métabolites, ceci en vue de garantir l'efficacité et la crédibilité des mesures prises. Dans ce contexte et en vue de garantir la compétitivité économique, une **stratégie de gestion à long terme concernant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, y compris une réduction progressive de leur impact sur la qualité de l'eau potable**, est à prévoir dans le cadre de la réglementation se rapportant aux zones de protection eaux potables¹⁷. Cette stratégie comprendra un accompagnement rapproché des agriculteurs, ainsi que la promotion d'autres programmes de réduction de produits phytopharmaceutiques dans l'ensemble des secteurs (voir aussi action A2.4).

De même, en application du principe de précaution, les démarches aux niveaux international et national visant à la réduction progressive des apports en TFA en provenance d'autres origines doivent être renforcées sans délai (A.2.3) : Il s'agit notamment des émissions atmosphériques **des gaz fluorés** (systèmes de climatisation, pompes à chaleur), ainsi que d'autres sources supplémentaires telles que les

effluents des stations d'épuration (traitement des eaux usées), les résidus de médicaments, les textiles (vêtements) ou encore des produits cosmétiques.

Des **enquêtes sur l'utilisation des PFAS / TFA auprès des acteurs industriels luxembourgeois** (A.6.1) seront préparées dès 2026. De même, les meilleures approches en vue de la réduction au niveau national des gaz susceptibles de se dégrader en TFA (e.g. R-454C, R-513A) au niveau des pompes à chaleur et climatiseurs seront identifiées (A.7.1).

Les administrations concernées mettront en place dès 2026 des stratégies en vue d'identifier et de planifier aussi bien des **campagnes de biomonitoring humain** (A.3.1) que des campagnes d'échantillonnage dans les domaines de l'environnement (A.4.1) et de la protection des consommateurs (A.5.1). Une priorité sera notamment donnée à la mesure des **concentrations de TFA dans les eaux de pluie**.

Des **interventions dans les différents organes internationaux (A.9) sont prioritaires**. Ceci avec l'objectif de réduire significativement les risques d'exposition aux PFAS (interdiction et réglementation de substances/produits, limites d'émission...) et d'adopter des approches harmonisées au sein de l'Union européenne.

La **sensibilisation du grand public** et des acteurs, notamment par une communication transparente des résultats et des connaissances sur les impacts et les origines des PFAS (A.8) est indispensable. La publication des résultats de campagnes d'analyse comme les résultats d'analyse des eaux potables (A.1.3) fait partie intégrante de cette sensibilisation. Dès 2026, il est prévu de publier un plan d'action PFAS (A.10.5).

Pour mener à bien toutes les actions, la création **d'un groupe interministériel formel approuvé par le Conseil de gouvernement** est proposée (A.10.2). Ce groupe devra également comprendre des représentants du **ministère de l'Économie**.

¹⁷Règlement grand-ducal du 9 juillet 2013 relatif aux mesures administratives dans l'ensemble des zones de protection pour les masses d'eau souterraine ou parties de masses d'eau souterraine servant de ressource à la production d'eau destinée à la consommation humaine.

6. Annexes

Annexe I	Composition du groupe interministériel
Annexe II	Liste des actions recommandées
Annexe III	Origine du TFA dans les eaux du Luxembourg Rapport élaboré par l'Administration de la gestion de l'eau en 2025
Annexe IV	Carte des distributions des concentrations en TFA dans les réseaux d'approvisionnement public en eau potable

7. Références

1. L. Ahrens, M. Bundschuh, Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: a review. *Environ Toxicol Chem* 33, 1921-1929 (2014).
2. L. G. T. Gaines, Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *Am J Ind Med* 66, 353-378 (2023).
3. F. Xiao, Emerging poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: A review of current literature. *Water Res* 124, 482-495 (2017).
4. M. G. Evich et al., Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science* 375, eabg9065 (2022).
5. M. Shoeib, T. Harner, P. Vlahos, Perfluorinated Chemicals in the Arctic Atmosphere. *Environmental Science & Technology* 40, 7577-7583 (2006).
6. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal* 18, e06223 (2020).
7. I. Rosato, T. Bonato, T. Fletcher, E. Batzella, C. Canova, Estimation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) half-lives in human studies: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Research* 242 (2024).
8. C. H. Yu, C. P. Weisel, S. Alimokhtari, P. G. Georgopoulos, Z. T. Fan, Biomonitoring: A tool to assess PFNA body burdens and evaluate the effectiveness of drinking water intervention for communities in New Jersey. *Int J Hyg Environ Health* 235, 113757 (2021).
9. United Nations Environment Programme (UNEP) (2009) Listing of Perfluorooctane Sulfonic Acid, its Salts and Perfluorooctane Sulfonyl Fluoride. UNEP-POPS-COP.4-SC-4-17. Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Geneva, Switzerland.
10. United Nations Environment Programme (UNEP) (2019) Listing of Perfluorooctanoic Acid (PFOA), its Salts and PFOA-Related Compounds. UNEP-POPS-COP.9-SC-9-12. Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Geneva, Switzerland.
11. United Nations Environment Programme (UNEP) (2022) Perfluorohexane Sulfonic Acid (PFHxS), its Salts and PFHxS-Related Compounds. Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Geneva, Switzerland.
12. United Nations Environment Programme (UNEP) (2021) Proposal to List Long-Chain Perfluorocarboxylic Acids, Their Salts and Related Compounds in Annexes A, B And/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Geneva, Switzerland.
13. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2017) IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, No. 110.
14. European Parliament and the Council of the European Union (2019) Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on persistent organic pollutants.
15. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. *EFSA J* 16, e05194 (2018).
16. European Commission (2023) Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006.
17. European Commission (2022) Commission Recommendation (EU) 2022/1431 of 24 August 2022 on the monitoring of perfluoroalkyl substances in food.
18. Umwelt Bundesamt (2023) Trifluoroacetate (TFA): Laying the foundations for effective mitigation.



Annexes

I - IV

Annexe I - Composition du groupe interministériel

Nom	Prénom	Ministère	Administration
Schaul	Tom	MECB (Coordination du groupe)	/
Faé	Jérôme	MECB	/
Gengler	Gilles	MECB	AEV
Mathis	Wolter	MECB	AEV
Bechet	Tom	MECB	AGE
Lambert	Brigitte	MECB	AGE
Santer	Michel	MAAV	/
Barthelmy	Roger	MAAV	SER
Engel	Jacques	MAAV	ASTA
Züst	Danny	MAAV	ALVA
Rausch	Tom	M3S	/
Dostert	Catherine	M3S	DISA
Wurth	Laurence	M3S	DISA

Annexe II - Liste des actions recommandées

Le groupe interministériel « PFAS » a identifié **40 actions** qui s'articulent autour des 4 axes suivantes :



Axe 1 – Connaissance

Acquérir des **connaissances supplémentaires** sur les sources de pollution et le degré d'exposition aux substances.
Evaluation des risques.



Axe 2 – Surveillance

Améliorer et renforcer la **surveillance** tout en mobilisant les données générées pour agir.



Axe 3 – Action

Réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS et mettre en œuvre des mesures de réduction de la pollution.



Axe 4 – Sensibilisation

Mieux **informer** et **sensibiliser** le public.

Groupe d'action A.1

Campagne de mesure sur la qualité de l'eau potable

Acquérir des connaissances fiables sur la présence et l'évolution des PFAS et du TFA dans les différentes sources d'eau potable (robinet et embouteillée) et sensibiliser le public par une communication transparente.



A.1.1 Campagne de mesure sur la qualité de l'eau du robinet

Réaliser des campagnes de mesures sur la qualité de l'eau du robinet, en collaboration avec les fournisseurs d'eau potable. Les analyses incluront le TFA (trifluoroacétate) ainsi que les paramètres PFAS normés par la directive européenne 2020/2184 relative aux eaux destinées à la consommation humaine.

Objectif : Suivre l'évolution des concentrations en PFAS et TFA dans les captages et réseaux pour évaluer la conformité réglementaire et anticiper les risques pour la santé publique.

Acteurs : MECB, AGE, M3S, DISA et fournisseurs d'eau potable (communes, syndicats de communes)



A.1.2 Campagne de mesure sur la qualité de l'eau embouteillée

Réaliser des campagnes de mesures sur la qualité de l'eau embouteillée, en collaboration avec les entreprises concernées. Les analyses incluront le TFA (trifluoroacétate) ainsi que les paramètres PFAS normés par la directive européenne 2020/2184 relative aux eaux destinées à la consommation humaine.

Objectif : Suivre l'évolution des concentrations en PFAS et TFA dans les captages et réseaux pour évaluer la conformité réglementaire et anticiper les risques pour la santé publique.

Acteurs : MAAV, ALVA et industrie (entreprises eau embouteillée)



A.1.3 Rédaction d'un rapport annuel sur les campagnes de surveillance

Publier chaque année un rapport synthétisant les résultats des campagnes de mesure, incluant des informations sur les risques pour la santé, afin d'assurer une communication transparente auprès des consommateurs.

Objectif : Garantir une information claire et accessible sur la qualité de l'eau et les risques sanitaires, en renforçant la transparence et la confiance du public.

Acteurs : MECB, AGE, M3S, DISA, MAAV et ALVA



Groupe d'action A.2

Amélioration et préservation de la qualité de l'eau potable

Acquérir des connaissances sur les origines du TFA et des PFAS dans l'eau potable, surveiller leur présence, définir et mettre en œuvre des mesures ciblées pour réduire les apports, et sensibiliser les acteurs concernés afin de protéger la qualité des eaux.



A.2.1 Identification détaillée de l'origine de TFA et PFAS dans l'eau potable

Mener des études scientifiques et des enquêtes pour identifier les sources de TFA et PFAS dans l'eau potable. Cela inclut :

- Campagnes d'échantillonnage et analyses (eaux de pluie, zones agricoles, industrielles)
- Collaboration avec instituts nationaux et internationaux
- Enquêtes auprès des utilisateurs et investigations dans les zones industrielles (ex. Contern)

Une priorité sera donnée au TFA, puis aux autres PFAS.

Objectif : Déterminer les origines agricoles, industrielles et atmosphériques du TFA et des PFAS pour orienter des mesures de réduction à l'échelle nationale.

Acteurs : MECB, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, MECO, fournisseurs d'eau potable, LIST, groupe de travail GW Pollution, secteur agricole, FEDIL et groupement d'intérêt zone industrielle de Contern ("business club")



A.2.2 Limitation des produits phytopharmaceutiques générant du TFA dans les zones de protection des eaux potables

Réduction progressive de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques générant du TFA dans les zones de protection des eaux potables. Ceci en tenant compte aussi bien des impacts sur la qualité de l'eau que des pratiques agricoles. Cette mesure est vivement recommandée car le traitement curatif des eaux contaminées par TFA (par osmose inverse) est très coûteux, entraîne une perte d'environ 25 % de l'eau distribuée et n'est pas réalisable sur la majorité des captages. Une évaluation d'impact préalable sera donc nécessaire avant toute interdiction.

Il est à considérer que tout remplacement d'un produit

par un autre risque d'impacter aussi bien la qualité de l'eau que la sécurité de planification de l'agriculture.

Par conséquent, toute limitation de gestion de produits phytopharmaceutiques générant du TFA dans les zones de protection doit se faire de manière holistique. C'est-à-dire que l'ensemble des produits et de leurs métabolites sont à considérer. Dans ce contexte et en vue de garantir la compétitivité économique, une stratégie de gestion à long terme concernant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques y compris une réduction progressive de leur impact sur la qualité de l'eau potable, est à prévoir dans le cadre de la réglementation se rapportant aux zones de protection eaux potables. Cette stratégie comprendra un accompagnement rapproché des agriculteurs.

Objectif : Réduire les concentrations en TFA dans les réseaux de distribution en eau potable en agissant sur les produits phytopharmaceutiques.

Acteurs : MECB, AGE, MAAV, ASTA, fournisseurs d'eau potable, M3S, DISA, SER, secteur agricole et commerçants de produits phytopharmaceutiques



A.2.3 Réduction progressive des apports en TFA en provenance d'autres origines que celles mentionnées sous le point A.2.2

Mettre en œuvre des mesures pour réduire les apports de TFA issus de sources autres que les produits phytopharmaceutiques, notamment :

- Gestion de l'épandage de purin/lisier en fonction des résultats de présence de TFA et PFAS
- Réduction des rejets industriels (eaux et émissions atmosphériques), en particulier dans la zone industrielle de Contern
- Les mesures seront définies sur la base des conclusions de l'action A.2.1

Objectif : Identifier et appliquer des mesures ciblées pour limiter la présence de TFA dans les eaux potables provenant d'autres sources.

Acteurs : MECB, AGE, AEV, M3S, DISA, MECO, MAI, MMTP, Administration des ponts et chaussées, CGDIS, Administration de l'aéroport de Luxembourg, CFL et groupement intérêt zone industrielle Contern ("business club") fournisseurs d'eau potable, FEDIL, organisation protection de la nature



A.2.4 Promotion de programmes de réduction des produits phytopharmaceutiques dans les zones de protection des eaux potables

Cette action prévoit la mise en place de programmes volontaires proposant des alternatives à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. Développer et mettre en œuvre des programmes de mesures visant à réduire, l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PP) dans les zones de protection des eaux potables, conformément à l'article 44 de la loi modifiée du 19 décembre 2008. Dans le secteur agricole, il peut être recouru aux mesures décrites dans le plan d'action national de réduction des produits phytopharmaceutiques ou encore à d'autres programmes proposés dans le cadre de la loi agraire.

Objectif : Faciliter la mise en œuvre immédiate et volontaire de mesures visant à réduire les concentrations en TFA et PFAS dans les eaux potables, tout en évitant de générer d'autres risques de contamination potentielle.

Acteurs : MECB, AGE, MAAV, ASTA, MAI, MMTP, M3S, MECO, fournisseurs d'eau potable, Administration des ponts et chaussées, CGDIS, SYVICOL, administrations communales, FEDIL, organisation protection de la nature, administration de l'aéroport de Luxembourg, CFL et groupement intérêt zone industrielle Contern ("business club")



Groupe d'action A.3

Biomonitoring humain

Acquérir des connaissances sur l'exposition humaine aux PFAS et au TFA par des études de biomonitoring, afin d'évaluer les risques sanitaires et orienter des mesures ciblées.



A.3.1 Etablissement d'une stratégie nationale de biomonitoring humain

Mettre en place une stratégie nationale de biomonitoring pour mesurer l'exposition de la population aux PFAS, y compris au TFA. Cette stratégie inclura des études pour évaluer le degré d'exposition actuel et un suivi à long terme pour observer l'évolution de cette exposition dans le temps.

Objectif : Acquérir des données fiables sur l'exposition de la population aux PFAS et TFA et suivre son évolution.

Acteurs : M3S et DISA



A.3.2 Biomonitoring et surveillance ciblée de l'état de santé de certains groupes potentiellement exposés

Mettre en place un biomonitoring et une surveillance ciblée pour évaluer l'exposition et l'état de santé de groupes potentiellement exposés aux PFAS et TFA, tels que les sapeurs-pompiers et les agriculteurs. Suivre à long terme l'évolution de l'exposition dans la population.

Objectif : Acquérir des connaissances sur le degré d'exposition et l'état de santé des groupes à risque, et assurer un suivi longitudinal pour anticiper les impacts sanitaires.

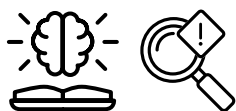
Acteurs : M3S et DISA



Groupe d'action A.4

Campagnes de mesures sur la présence de TFA et de PFAS dans l'environnement

Acquérir des connaissances complètes sur la présence et la répartition des PFAS et du TFA dans les différents milieux (eaux, sols, air, sédiments, pluie), grâce à des campagnes coordonnées et des méthodes accréditées, afin de surveiller les niveaux de contamination et orienter les mesures de gestion.



A.4.1 Inventaire et planification des campagnes d'échantillonnage

Réaliser un inventaire des données existantes, identifier les lacunes et obstacles, et définir les pistes pour obtenir ces données, et les méthodes d'analyse disponibles ou à développer. Intégrer les résultats des actions A.1 et A.2 pour prioriser les actions A.4.2 à A.4.8, y compris l'estimation des budgets pluriannuels.

Objectif : Planifier efficacement les campagnes d'échantillonnage en définissant les besoins, les méthodes et les priorités pour combler les lacunes de connaissance.

Acteurs : MECB, AGE et AEV



A.4.2 Mise en place de méthodes accréditées pour l'analyse des PFAS et TFA

Développer et mettre en œuvre des méthodes accréditées pour l'analyse des PFAS et TFA dans différents compartiments (rejets atmosphériques, rejets aqueux, eau, sols, sédiments, air, organismes vivants). Cette action s'appuiera sur les conclusions des sous-actions A.4.1 et A.6.

Objectif : Garantir des analyses fiables et harmonisées pour la surveillance des PFAS et TFA dans tous les milieux concernés.

Acteurs : AGE et AEV



A.4.3 Coordination des campagnes de mesures dans les eaux, les sols et l'air

Coordonner des campagnes de mesures dans les milieux eau, sol et air pour établir un niveau de base des concentrations en PFAS et TFA, en tenant compte des différentes sources d'émission. Cette action vise à obtenir des données permettant d'identifier les principales sources d'émissions et s'appuie sur les conclusions des actions A.4.1 et A.6.

Objectif : Assurer une coordination efficace pour disposer de données fiables sur les niveaux de base et les sources d'émission.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, MAAV et ASTA



A.4.4 Campagnes de mesure dans les eaux de surface et souterraines

Poursuivre et renforcer les campagnes existantes de mesure des PFAS et TFA dans les eaux de surface et les eaux souterraines en adaptant les campagnes en fonction des résultats de la sous-action A.2.3 pour obtenir un aperçu précis de l'envergure des contaminations.

Objectif : Évaluer l'ampleur de la contamination des eaux par les PFAS et TFA afin d'orienter les mesures de gestion.

Acteur : AGE



A.4.5 Campagne de mesure dans les eaux de pluie

Planifier et réaliser des campagnes de mesure des PFAS et TFA dans les eaux de pluie pour évaluer leur contribution à la contamination de l'eau potable et leur impact potentiel sur l'environnement et la santé. Cette action inclura :

- Identification des points de mesure et des fréquences d'échantillonnage
- Définition des méthodes d'analyse
- Mise en œuvre des campagnes selon les stratégies définies

Objectif : Évaluer le rôle des eaux de pluie et des rejets atmosphériques dans la contamination par PFAS et TFA pour orienter les mesures de réduction.

Acteurs : AEV et AGE



A.4.6 Poursuite des campagnes de mesure dans les sols des sites contaminés

Planifier et réaliser des campagnes de mesure des PFAS, y compris le TFA, dans les sols des sites contaminés. Cette action inclura :

- Identification des points de mesure et des fréquences d'échantillonnage
- Définition des méthodes d'analyse
- Mise en œuvre des campagnes selon les stratégies définies

Objectif : Évaluer la présence des PFAS dans le milieu et les risques de migration vers d'autres compartiments (eaux, air).

Acteur : AEV



A.4.7 Campagnes de mesure eaux de rejets

Planifier et réaliser des campagnes de mesure des PFAS, y compris le TFA, en amont des rejets dans les eaux de surface (aéroports, sites industriels, sites contaminés, stations d'épuration, surfaces agricoles) ainsi que dans les boues d'épuration. Cette action inclura :

- Identification des points de mesure et des fréquences d'échantillonnage
- Définition des méthodes d'analyse
- Mise en œuvre des campagnes selon les stratégies définies

Objectif : Identifier les sources majeures de rejets et évaluer les risques de transfert des PFAS et TFA pour orienter des mesures de réduction.

Acteurs : AEV et AGE



A.4.8 Évaluation de la pertinence d'une campagne de mesure dans les sédiments

Évaluer la nécessité de réaliser une campagne de mesure des PFAS, y compris le TFA, dans les sédiments, en identifiant les points de mesure, les fréquences d'échantillonnage et les méthodes d'analyse.

Objectif : Décider de la mise en œuvre d'une campagne de mesure dans les sédiments pour mieux comprendre la contamination et ses transferts.

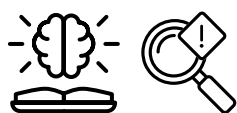
Acteurs : AEV et AGE



Groupe d'action A.5

Campagnes de mesures

Acquérir des connaissances approfondies sur la présence des PFAS (y compris TFA) dans les denrées alimentaires, les matériaux en contact avec celles-ci et les produits de consommation, en identifiant les lacunes et en optimisant les campagnes d'échantillonnage, afin de mieux évaluer les risques pour la santé, orienter les mesures de gestion et surveiller la contamination potentielle.



A.5.1 Inventaire et optimisation des campagnes d'échantillonnage

Réaliser un inventaire des données existantes, identifier les obstacles et les informations manquantes, définir les pistes pour obtenir ces données et optimiser les campagnes d'échantillonnage en fonction des besoins.

Objectif : Optimisation des campagnes d'échantillonnage.

Acteurs : MAAV, ALVA et M3S

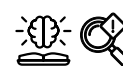


A.5.2 Campagnes de mesure PFAS dans les denrées alimentaires

Organiser des campagnes de mesure des PFAS, y compris le TFA, dans les denrées alimentaires. Définir les produits à analyser, la fréquence des prélèvements et les méthodes disponibles en fonction des capacités des laboratoires. Intégrer ces analyses dans la planification annuelle d'échantillonnage.

Objectif : Monitoring de la contamination potentielle en PFAS dans les denrées alimentaires.

Acteurs : MAAV et ALVA



A.5.3 Campagnes de mesures PFAS dans les matériaux et produits de consommation

Mettre en place des campagnes de mesure des PFAS, y compris le TFA, dans les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, ainsi que dans différents produits de consommation et flux pertinents, tels que les médicaments, les textiles, les produits cosmétiques et les effluents des stations d'épuration. Définir les types de matériaux à analyser, la fréquence des prélèvements et les méthodes analytiques disponibles en fonction des capacités des laboratoires. Intégrer ces analyses dans la planification annuelle d'échantillonnage.

Objectif : Monitoring de la contamination potentielle en PFAS des matériaux en contact avec les denrées alimentaires.

Acteurs : MAAV et ALVA, AEV, MECO, DISA



Groupe d'action A.6

Inventaire de l'utilisation de PFAS et TFA

Acquérir des connaissances précises sur les usages et les sources de contamination par les PFAS et le TFA, en identifiant les zones prioritaires et les acteurs concernés, afin de préparer des stratégies nationales de réduction et orienter les mesures de gestion.



A.6.1 Enquêtes sur l'utilisation des PFAS/TFA auprès des acteurs industriels

Réaliser un inventaire national auprès des acteurs publics et privés (industriels) sur l'utilisation de produits susceptibles d'émettre des PFAS, malgré l'absence de cadre juridique. L'enquête inclura l'analyse des possibles origines d'émissions (ex. pompes à chaleur, systèmes de climatisation) et s'appuiera sur les actions déjà menées par le CGDIS. Les résultats serviront à alimenter et orienter les sous-actions A.2.5 et A.4.2.

Objectif : Acquérir des informations fiables sur les usages et sources potentielles d'émission de PFAS/TFA pour préparer des mesures de réduction et améliorer la planification des campagnes de surveillance.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, MECO, MMTP et FEDIL



A.6.2 Identification des sources de contamination hot spots en vue de mettre en place des stratégies nationales de réduction

Synthétiser les résultats des actions A.1.3, A.3, A.4 et A.6 pour identifier les zones et sources majeures de contamination par PFAS/TFA. Cette analyse permettra de définir des mesures nationales de réduction, d'évaluer leur impact et d'anticiper les conséquences en cas de non-application. Les mesures retenues seront intégrées dans le plan d'action et serviront de base aux sous-actions A.7.2, A.7.3 et A.7.4.

Objectif : Préparer des stratégies nationales ciblées pour réduire les émissions de PFAS/TFA en s'appuyant sur une identification précise des sources et des zones prioritaires.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



Groupe d'action A.7

Réduction des risques PFAS et de la pollution environnementale

Mettre en œuvre des actions ciblées pour réduire les émissions de PFAS et TFA dans les secteurs identifiés (technologies thermiques, agriculture, autres domaines), en favorisant des alternatives durables, en adaptant la législation et en intégrant ces mesures dans la stratégie nationale.



A.7.1 Réduction des gaz générant du TFA dans pompes à chaleur et climatiseurs

Analyser la possibilité de réduire l'utilisation de réfrigérants à fort potentiel de formation de TFA en favorisant les technologies utilisant des gaz naturels (propane, CO₂, etc.) via des programmes de subvention pour les nouvelles installations. Cette action inclut l'adaptation éventuelle de la législation et des régimes de subsides existants, ainsi que la mise en place d'un RGD pour la réception des installations.

Objectif : Limiter les émissions de TFA liées aux systèmes thermiques et de climatisation en promouvant des alternatives plus durables et en préparant un cadre réglementaire adapté.

Acteurs : MECB, AEV, MECO, FEDIL et Klima-Agence



A.7.2 Adaptation des modes de production agricoles

Identifier et promouvoir des solutions alternatives aux produits phytopharmaceutiques (ex. pratiques mécaniques, produits de substitution) pour les productions existantes. Adapter la législation si nécessaire et intégrer les nouvelles mesures dans le Plan Stratégique National (PSN).

Objectif : Réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans les zones sensibles en favorisant des pratiques agricoles durables et compatibles avec la protection des eaux potables.

Acteurs : MAAV, ASTA, SER, secteurs agricoles et commerçants de produits phytopharmaceutiques



A.7.3 Réduction dans d'autres domaines tels que l'utilisation de produits contenant du PFAS (textiles, cosmétiques, jouets...)

Mettre en place des mesures de réduction des PFAS/TFA dans les domaines identifiés par l'action A.7.1. Adapter si nécessaire la législation et/ou les régimes de subsides existants pour faciliter la mise en œuvre des mesures. Réaliser des interventions aussi bien au niveau national qu'international.

Objectif : Réduire les émissions de PFAS/TFA dans les secteurs prioritaires en s'appuyant sur les conclusions des analyses préalables et en intégrant les mesures dans la stratégie nationale.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MECO, FEDIL et Klima-Agence



Groupe d'action A.8

Campagnes d'information

Sensibiliser et informer la population et les acteurs professionnels sur les risques liés aux PFAS et TFA, grâce à des rapports accessibles, des campagnes de communication claires et des formations adaptées, afin de promouvoir des pratiques responsables sans générer de panique.



A.8.1 Publication de rapports annuels accessibles au grand public

Publier des rapports annuels clairs et compréhensibles pour informer la population sur la présence et les risques liés aux PFAS/TFA, en s'appuyant sur des données scientifiques issues des actions A.1 à A.7. Les campagnes de communication viseront à sensibiliser sans générer de panique.

Objectif : Assurer une information transparente et pédagogique du public sur les risques liés aux PFAS/TFA afin de renforcer la sensibilisation et la confiance.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.8.2 Campagne de sensibilisation pour une consommation éclairée

Informer le grand public sur les risques liés aux PFAS et sur les moyens de les éviter, en s'appuyant sur des données scientifiques et les rapports annuels des actions A.1 à A.7. La campagne inclura la promotion de l'étiquetage des produits, la communication sur le règlement européen (UE) 2024/573 relatif aux gaz à effet de serre fluorés, et la présentation des solutions envisagées pour réduire l'exposition.

Objectif : Sensibiliser la population à une consommation responsable et éclairée afin de limiter l'utilisation et l'exposition aux PFAS, tout en renforçant la transparence et la confiance.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.8.3 Adaptation des conseils et formations sur l'usage professionnel des produits phytopharmaceutiques

Renforcer le réseau de conseil spécialisé dans la gestion des produits phytopharmaceutiques (conseil intégré) pour les différents secteurs professionnels, y compris les commerçants de ces produits. Évaluer la possibilité d'élargir leurs compétences afin qu'ils participent activement au conseil et à la sensibilisation.

Objectif : Améliorer la formation et le conseil sur l'utilisation des produits phytopharmaceutiques pour réduire les risques liés aux PFAS/TFA et sensibiliser les professionnels et distributeurs.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, MAAV, ASTA, SER, ALVA, secteur agricole, instituts de conseil en agriculture et commerçants de produits phytopharmaceutiques



A.8.4 Campagnes d'informations dans le domaine industriel

Organiser des campagnes de sensibilisation à destination des acteurs industriels sur les risques liés aux PFAS/TFA et sur les obligations réglementaires, notamment le Règlement (UE) 2024/573 relatif aux gaz à effet de serre fluorés. Ces campagnes viseront à informer sur les impacts des produits phytopharmaceutiques et à promouvoir des pratiques réduisant les risques pour la santé publique et l'environnement.

Objectif : Renforcer la connaissance et la conformité réglementaire des acteurs industriels afin de réduire l'impact des PFAS/TFA et des produits phytopharmaceutiques sur la santé et l'environnement.

Acteurs : MECB, AGE, AEV, MECO, FEDIL et Syvicol



Groupe d'action A.9

Soutien actif des initiatives au niveau européen

Agir au niveau européen et international pour surveiller, harmoniser et réduire les risques liés aux PFAS et TFA, en soutenant les initiatives réglementaires, en participant aux groupes de travail et en plaidant pour des normes communes afin de protéger la santé publique et l'environnement.



A.9.1 Suivi et interventions auprès des instances européennes sur les normes de potabilité PFAS/TFA

Assurer une veille et intervenir auprès des instances européennes (COM, ECHA...) pour influencer l'adaptation des normes de potabilité des PFAS et du TFA. Participer aux consultations et défendre une approche harmonisée au niveau européen (classification, valeurs limites, restrictions). Une décision est attendue en 2025-2026 concernant les normes de potabilité du TFA.

Objectif : Plaider pour une harmonisation des normes de potabilité des PFAS et du TFA au niveau européen afin de réduire les risques pour la santé publique et garantir une cohérence réglementaire entre les États membres.

Acteurs : MECB, AGE, M3S, DISA et fournisseurs d'eau potable



A.9.2 Soutien aux initiatives de restriction de la fabrication de la mise sur le marché et de l'utilisation des PFAS

Appuyer activement les initiatives européennes visant à restreindre la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation des PFAS. Intervenir dans les groupes de travail (ex. Conseil ENVI) pour soutenir la stratégie européenne de durabilité des produits chimiques, la restriction élargie des PFAS sous REACH et les actions du groupe REACH-UP, tout en évitant les substitutions regrettables.

Objectif : Contribuer à la mise en œuvre des restrictions PFAS au niveau européen pour réduire les risques environnementaux et sanitaires.

Acteurs : MECB et AEV



A.9.3 Engagement pour la réduction de produits phytopharmaceutiques contenant des PFAS susceptibles d'impacter la santé publique et l'environnement

S'engager au sein du comité permanent de la chaîne alimentaire et de la santé animale de la Commission européenne pour promouvoir la réduction progressive des produits phytopharmaceutiques contenant des PFAS, en particulier ceux générant du TFA.

Objectif : Limiter l'impact sur la santé publique et l'environnement en réduisant l'usage de ces substances.

Acteur : MAAV



A.9.4 Normes européennes harmonisées pour TFA dans les eaux

Plaider pour la prise en compte du TFA et de ses propriétés moléculaires dans la révision des directives sur les normes environnementales pour les eaux de surface et souterraines. Ces discussions sont à mener de manière étroite avec l'harmonisation au niveau européen de la classification des métabolites de produits phytopharmaceutiques dans le cadre de la révision de la directive sur les eaux souterraines. Plaider pour l'établissement d'une liste européenne des métabolites pertinents et non pertinents (révision du document guide SANCO).

Objectif : Assurer une approche harmonisée au niveau européen pour la classification et la qualité des eaux.

Acteurs : MECB et AGE



A.9.5 Engagement dans le groupe de travail PFAS au sein de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)

Participer activement au groupe de travail PFAS de la

CIPR afin d'accélérer les décisions au niveau européen. Contribuer aux discussions sur les approches, stratégies et normes, et favoriser l'échange d'expériences pour identifier une approche commune.

Objectif : Promouvoir la coordination et l'harmonisation des actions PFAS entre les membres de la CIPR.

Acteurs : MECB et AGE



Groupe d'action A.10

Mise en place d'une cellule interministérielle (groupe interministériel)

Mettre en place une coordination efficace et des outils concrets pour suivre les actions, renforcer les connaissances scientifiques, promouvoir l'innovation et évaluer les coûts et impacts. Ces mesures visent à disposer d'une stratégie claire et transparente pour agir contre les PFAS/TFA et sensibiliser les acteurs.



A.10.1 Création d'une plateforme de collecte de données

Mettre en place une plateforme centralisant les données (rapports RAC/ECHA, registres d'utilisation...) pour identifier rapidement les substances à risque et faciliter les échanges interministériels.

Objectif : Améliorer la réactivité et la coordination dans la gestion des substances dangereuses.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.10.2 Création d'un groupe interministériel formel

Mettre en place un groupe interministériel incluant le ministère de l'Économie, avec une mission officielle validée par le Conseil de gouvernement.

Objectif : Renforcer la coordination entre ministères pour une approche cohérente sur les PFAS et TFA.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.10.3 Coordination et échanges sur les actions A.1 à A.9

Organiser des échanges réguliers sur l'avancement des actions et sous-actions, ajuster si nécessaire, renforcer la coopération interministérielle et promouvoir l'innovation pour la substitution des PFAS.

Objectif : Assurer une coordination efficace et améliorer les connaissances pour optimiser la mise en œuvre des actions.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.10.4 Création d'une plateforme d'échange avec des instituts de recherche

Mettre en place une plateforme pour collaborer avec des instituts (LIST, Uni.lu...) afin de suivre les avancées scientifiques, développer des innovations avec les acteurs économiques et soutenir la recherche sur les PFAS.

Objectif : Renforcer les connaissances scientifiques et favoriser l'innovation pour des solutions durables.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA, MECO et instituts de recherche



SER, ALVA, MECO, instituts de recherche et acteurs économiques



A.10.5 Rédaction d'un plan d'action PFAS/TFA

Élaborer un plan d'action couvrant la santé publique (biomonitoring, aliments) et l'environnement, incluant des recommandations nationales et internationales. Le plan comprendra un rapport annuel avec les résultats des campagnes de mesure.

Objectif : Mettre en place une stratégie coordonnée et transparente pour la gestion des PFAS et du TFA.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA, SER, ALVA et MECO



A.10.6 Réalisation d'une estimation budgétaire et impacts

Réaliser une estimation des coûts liés aux actions A.1 à A.9 et, si possible, évaluer les impacts sanitaires et environnementaux en cas de statu quo. L'étude pourra inclure différents volets selon l'avancement des actions.

Objectif : Évaluer les coûts et les impacts pour orienter les décisions et mesurer les bénéfices d'une stratégie PFAS/TFA.

Acteurs : MECB, AEV, AGE, M3S, DISA, MAAV, ASTA,

Annexe III - Origine du TFA dans les eaux du Luxembourg.

Rapport élaboré par l'Administration de la gestion de l'eau en 2025

Origine du TFA dans les eaux au Luxembourg

Rémy Schoppach, Julien Farlin

Introduction

L'acide trifluoroacétique (TFA) est un composé chimique très persistant issu principalement de la dégradation d'agents fluorés, notamment certains pesticides, réfrigérants et produits pharmaceutiques (Freeling et al., 2023). Il appartient à la famille des acides perfluorés et se caractérise par une forte stabilité chimique et une faible biodégradabilité. Cela est dû à la stabilité (bio)chimique exceptionnellement élevée du groupe $-CF_3$, ce qui entraîne la libération de TFA en tant que produit de dégradation quasi terminal dans l'environnement (Solomon et al., 2016). De ce fait, il peut s'accumuler dans les écosystèmes aquatiques et est fréquemment quantifié dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Le groupe $-CF_3$ est un constituant courant de nombreux composés synthétiques (Scheurer et al., 2017), malgré le fait que les atomes de fluor soient extrêmement rares dans les molécules organiques d'origine naturelle.

La présence de TFA dans l'environnement suscite des préoccupations croissantes en raison de ses effets potentiels sur la santé humaine et les écosystèmes. Bien que le nombre d'études sur sa toxicité soit encore limité, des indices suggèrent qu'il pourrait affecter la croissance des plantes aquatiques et altérer certains processus biologiques chez les organismes vivants. A l'heure actuelle, c'est surtout sa nature persistante et les niveaux environnementaux croissants qui justifient une vigilance continue. Particulièrement, sa présence persistante dans l'eau potable constitue une problématique potentielle, car il est difficile à éliminer avec les méthodes de traitement conventionnelles (Scheurer et al., 2017, Zhou et al., 2022).

L'origine du TFA dans l'environnement est encore débattue, bien que plusieurs sources aient été identifiées. L'hypothèse d'une formation géologique naturelle de TFA qui a longtemps été soutenue est sérieusement remise en cause ces dernières années, notamment par l'absence de données validant cette hypothèse (Joudan et al., 2021) et par des concentrations très faibles, voire nulles, dans les forages ayant des fenêtres de recharges supérieures à 50 ans (Albers and Sültenfuss, 2024) ou dans des carottes de glaces d'avant 1990 (Pickard et al., 2020). En revanche, de plus en plus d'études récentes indiquent que de grandes quantités de TFA sont libérées dans l'environnement par diverses sources anthropiques, et que les concentrations de TFA dans certains compartiments environnementaux ont considérablement augmentées au cours des dernières décennies (Freeling et al., 2020 ; 2022 ; Pickard et al., 2020 ; Cahill et al., 2022).

Le TFA est un produit de dégradation connu de nombreux gaz fluorés tels que les hydrofluorocarbures (HFC) utilisés dans diverses applications, notamment dans la réfrigération (Hurley et al., 2008, Wallington et al., 1996, Freeling et al., 2023). Ces substances, sous l'effet des rayons ultraviolets, se transforment en TFA qui retombe ensuite sur les sols et les cours d'eau sous forme de précipitations. En effet, en raison de ses propriétés, le TFA est principalement retiré de l'atmosphère via solubilisation dans l'humidité atmosphérique (Bowden et al., 1996). Il est très probable que ce type de dépôt atmosphérique ait

entraîné et continue d'augmenter une contamination de fond ubiquitaire de l'environnement aquatique et terrestre par le TFA. Par exemple, le TFA a été détecté dans 89 % des puits d'eau souterraine ($n = 247$) au Danemark, lors d'une étude de dépistage menée par l'Agence danoise de protection de l'environnement en 2021. Le TFA a été mesuré dans 1187 échantillons de précipitations collectés sur une période de 12 mois consécutifs en 2018/2019, à huit emplacements répartis à travers l'Allemagne (Freeling et al., 2020). La concentration moyenne de TFA pondérée par les précipitations ($0,335 \mu\text{g/L}$; flux de dépôt humide : $190 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$) dans cette étude était environ quatre fois plus élevée que celle rapportée en 1995/1996 en Allemagne (Klein, 1997). Ces chiffres correspondent également à l'augmentation de la concentration en TFA retrouvée dans des épinettes de plusieurs espèces d'arbre archivées entre 1985 et 2022 dans la Saare et à Leipzig en Allemagne, et expliquée par la bioaccumulation du TFA et l'accroissement des émissions de gaz précurseurs de TFA sur les trois dernières décennies (Freeling et al., 2022). De plus, la surveillance effectuée par Freeling et al., a mis en évidence une saisonnalité marquée de la concentration en TFA dans les échantillons de précipitations collectés, avec des valeurs maximales en été et minimales en hiver (Freeling et al., 2020). Une saisonnalité similaire du flux de TFA a également été observée dans les précipitations en Suède (Björnsdotter et al., 2022), ainsi que dans la neige de surface collectée dans l'Arctique norvégien (Björnsdotter et al., 2021).

En outre, certains sites industriels peuvent également contribuer à la diffusion du TFA dans l'eau via des rejets ponctuelles directs ou indirectes (par dégradation de molécules précurseurs) (Xie et al., 2020). En effet, le TFA est largement utilisé comme solvant et catalyseur. De plus, le TFA sert de réactif de départ pour la préparation de briques élémentaires utilisées dans la synthèse de nombreux composés organiques fluorés (López and Salazar 2013). Lors de plusieurs études réalisées sur les eaux de surface dont certaines en Allemagne, des niveaux exceptionnellement élevés de TFA allant jusqu'à $140 \mu\text{g/L}$ ont été détectés en aval de rejets industriels (Scheurer et al., 2017 ; Chen et al., 2018).

Des recherches ont montré que les eaux usées et les masses d'eau influencées par les eaux usées peuvent également présenter un potentiel de formation de TFA par dégradation biotique ou abiotique (*i.e.* par ozonation (Scheurer et al., 2017) ou photodégradation (Tisler et al., 2019)). Cela s'explique par la présence de précurseurs du TFA, tels que des produits pharmaceutiques ou des biocides, dans les eaux usées, ainsi que par le fait que le TFA lui-même ne peut pas être éliminé par les procédés de traitement de l'eau couramment utilisés.

Dans les industries pharmaceutiques et agrochimiques, la conception des composés chimiques intègre depuis longtemps des groupes C-CF_3 dans les molécules afin d'augmenter leur efficacité en favorisant les interactions électrostatiques avec les cibles, en améliorant la perméabilité cellulaire et la biodisponibilité, ainsi que la stabilité chimique et métabolique (Inoue et al., 2020 ; Freeling et al., 2023). Parmi les produits agrochimiques, environ 40 % de tous les pesticides contenant du fluor actuellement sur le marché contiennent un groupe C-CF_3 (Ogawa et al., 2020), et certains d'entre eux ont déjà été identifiés comme des précurseurs du TFA (Scheurer et al., 2017). Joerss, Hanna, et al., (2024) ont recensé 143 substances actives de pesticides étant précurseurs de TFA. Parmi ces 143 substances actives, en date du 1^{er} mai 2025, 25 étaient autorisées au Luxembourg. Ensemble, ces 25 substances se retrouvent dans 82 produits phytopharmaceutiques autorisés sur le territoire Luxembourgeois.

Nödler et al., ont étudié la présence de diverses substances dont le TFA, dans les eaux de surface de l'État fédéral de Basse-Saxe, en Allemagne. La plus forte concentration en TFA ($3 \mu\text{g/L}$) parmi les échantillons collectés en mai 2018 ($n = 51$) a été détectée dans un échantillon présentant également la deuxième plus forte concentration totale de 70 pesticides, parmi lesquels figuraient des composés contenant une sous-structure C-CF_3 , comme le flufenacet et le diflufenican (Nödler et al., 2020). De plus, cet échantillon a montré un fort potentiel de formation de TFA (augmentation de 41 % de la concentration) lorsqu'il a été traité avec une concentration d'ozone de $0,5 \text{ mg/L}$ par mg de carbone organique dissous, ce qui indique la présence de précurseurs du TFA (par exemple des pesticides ou leurs produits de transformation) (Nödler et al., 2019). Une étude menée dans le bassin versant de la rivière Stever en Allemagne a révélé

de fortes variations saisonnières de la concentration en TFA. Les concentrations minimales étaient systématiquement observées à la fin de l'été. Ensuite, les concentrations augmentaient fortement, atteignant des valeurs maximales en hiver. La saisonnalité observée du TFA dans la Stever est très probablement liée à la dégradation des pesticides contenant le groupe C-CF₃ après leur application, suivie de l'export du TFA formé via le réseau hydrographique (Landwirtschaftskammer NRW, 2021). Cette hypothèse est étayée par la forte synchronie temporelle entre les séries de données du TFA et de l'acide sulfonique de flufénacet (flufénacet ESA), un métabolite mobile et stable du flufénacet. La baisse des concentrations en TFA et flufénacet ESA pendant les mois d'hiver pourrait s'expliquer par l'épuisement progressif du stock de flufénacet dans les sols agricoles après l'application d'automne. Ces résultats indiquent que l'application de pesticides contenant des groupes C-CF₃ peut induire dans les eaux de surface des concentrations en TFA nettement supérieures à la concentration moyenne annuelle pondérée par les précipitations, qui est actuellement d'environ 0,3 à 0,4 µg/L (Freeling et al., 2020).

Objectifs

Ce rapport cherche à explorer les sources du TFA au Luxembourg, en s'appuyant sur les recherches existantes menant aux sources les plus probables et sur les données disponibles les plus récentes. Il s'agira d'examiner les concentrations détectées dans les eaux souterraines et de surface et d'identifier les principales voies de contamination possibles. Comme démontré par l'état de l'art, la présence de TFA dans l'environnement semble résulter d'une combinaison de plusieurs origines dont la proportion de chacune peut varier spatialement et temporellement. Comme indiqué précédemment, les sources les plus probables de TFA sont la dégradation atmosphérique de composés fluorés volatils, certaines applications industrielles, les effluents urbains et l'utilisation de pesticides fluorés par le secteur agricole. Notre première hypothèse (H1) est qu'au Luxembourg, la présence de TFA dans les eaux souterraines est essentiellement due au dépôt atmosphérique et à l'impact agricole. Afin de tester cette hypothèse, nous avons défini les objectifs suivants :

- **O1.1** : Tester s'il existe une relation non spatialisée robuste entre un indicateur de pression agricole (la concentration en nitrates) et les concentrations en TFA.
- **O1.2** : Tester s'il existe une concentration de fond en TFA indépendamment de la localisation qui s'expliquerait vraisemblablement par une déposition atmosphérique uniforme.
- **O1.3** : Investiguer de possibles relations entre l'occupation et l'utilisation du sol dans les aires d'alimentation de captage d'eau et les concentrations moyennes en TFA.

Notre seconde hypothèse (H2) est que les concentrations en TFA dans les eaux de surface luxembourgeoise s'expliquent par la somme de contributions du ruissellement de surface et subsurface, des rejets industriels, des effluents urbains et des résurgences d'eau souterraine. Afin de tester cette seconde hypothèse, nous avons fixé les objectifs suivants :

- **O2.1** : Tester s'il existe une relation entre la variabilité du débit des cours d'eau, représenté par la variabilité de la conductivité, et les concentrations en TFA (crue vs temps sec).
- **O2.2** : Tester s'il existe une variabilité saisonnière des concentrations en TFA dans les eaux de surfaces (application agricole automnale).
- **O2.3** Investiguer de possibles relations entre l'occupation et l'utilisation du sol dans les bassins versants et les concentrations moyennes en TFA.

Matériels & Méthodes

En date du 30-07-2025, l'AGE dispose respectivement de 684 quantifications de TFA dans les eaux souterraines luxembourgeoises au sein de 327 ouvrages différents et de 1202 quantifications dans les eaux de surfaces à 90 L-Codes différents. Au sein de chaque échantillon, les concentrations en autres analytes tels que les nitrates, certains pesticides etc. ont également été déterminées. Dans ce rapport,

	Données	Référence	Année
1	European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.1	EEA 2016	2016
2	Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1	EEA	2020
3	FLIK	ASTA	2015
4	Land use/Land cover	LandCover / LandUse	2018
5	Pedology	Carte des associations de sols	2018
6	Geology	Administration des Ponts et Chaussées	2021
7	Aquifers	Administration de la gestion de l'eau	2016
8	Hydromorphology	Administration de la gestion de l'eau	2015
9	Regionalisation of discharge	ARGE, Dr. Winfried Willems (IAWG), Ottobrunn Kurtenbach und Partner, Trier	2018

seules les valeurs moyennes de TFA pour chaque point de mesure sont utilisées. Afin d'évaluer l'importance relative des différentes sources suspectées, nous mettons en relation neuf bases de données spatiales (Tableau 1) avec les quantifications en TFA disponibles. Ces bases de données nous renseignent entre autres sur la couverture du sol, l'utilisation du sol, la pédologie ou encore la géologie.

Tableau 1. Base de données spatiales utilisées dans cette étude.

Le tableau 2 décrit les surfaces incluses dans chacun des paramètres utilisés pour la production de figure au sein de ce rapport.

Dans le cadre de la délimitation des zones de protection d'eau potable, l'AGE a déterminé, via différents bureaux d'études, 123 aires d'alimentation de captage d'eau potable (Figure 5). Ce sont ces aires d'alimentation qui sont utilisées pour extraire les différentes caractéristiques d'occupation et d'utilisation du sol pour chacun des captages d'eau souterraine.

Données	Paramètre	Description
Corine	Terres arables et prairies	Terres soumises à un système de rotation, utilisées pour les cultures annuelles et les jachères, pluviales ou irriguées. Toutes les surfaces occupées par des cultures permanentes, hors rotation. Comprend les cultures ligneuses de cultures standard pour la production fruitière, telles que les vergers extensifs, les oliveraies, les châtaigneraies, les noyeraies, les vergers arbustifs tels que les vignes et certaines plantations spécifiques de vergers à système bas, les espaliers et les plantes grimpantes. Terres utilisées en permanence (au moins 5 ans) pour la production fourragère. Comprend les espèces herbacées naturelles ou semées, les prairies non améliorées ou légèrement améliorées et les prairies pâturées ou récoltées mécaniquement. Zones de cultures annuelles associées à des cultures permanentes sur une même parcelle, cultures annuelles cultivées sous des arbres forestiers, zones de cultures annuelles, prairies et/ou cultures permanentes juxtaposées, paysages où cultures et pâturages sont intimement mêlés à la végétation naturelle ou aux espaces naturels.
	Forêt	Superficies occupées par des forêts et des bois dont la végétation est composée de conifères et/ou de feuillus indigènes ou exotiques, et qui peuvent être utilisés pour la production de bois d'œuvre ou d'autres produits forestiers. Dans des conditions climatiques normales, les arbres forestiers atteignent une hauteur supérieure à 5 m et présentent une fermeture de la canopée d'au moins 30 %. Pour les jeunes plantations, la limite minimale est de 500 sujets par ha.
Lis - Land uses	Agriculture	La classification des zones agricoles comprend ici les trois grandes catégories d'utilisation des terres : les terres arables, les prairies et les cultures spéciales (vignes, vergers, sapin de Noël, etc.).
	Forêts	Le bloc thématique « forêt » est principalement composé de la classe d'occupation du sol « végétation ligneuse ». Une « forêt » est composée de végétation ligneuse d'une surface supérieure à 500 m ² , bien que plusieurs parcelles plus petites puissent également être classées comme forêt si, globalement, elles atteignent une densité de couvert arboré supérieure à 10 % et une surface totale supérieure à 500 m ² .

Tableau 2. Description des champs de la base de données spatiales utilisées dans cette étude.

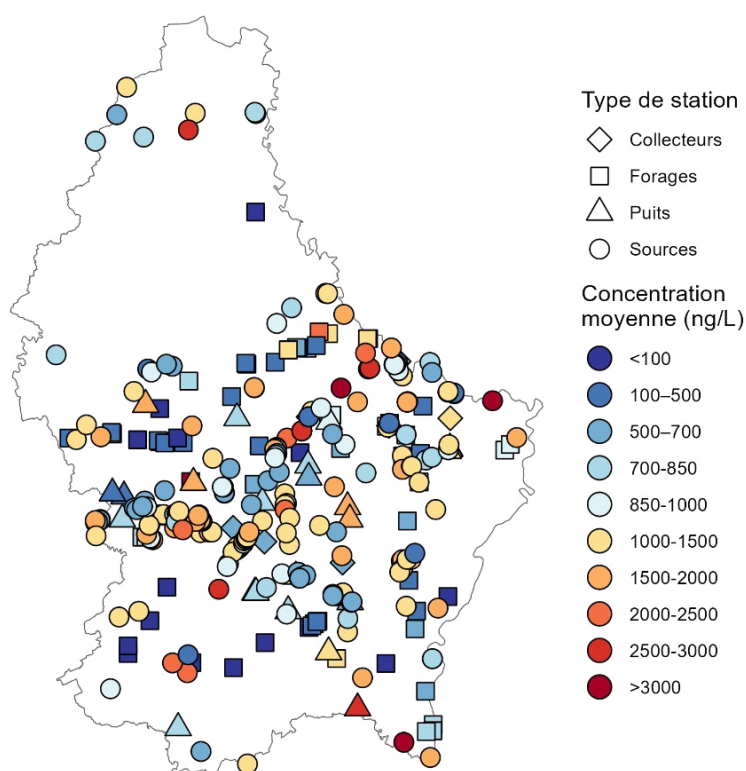


Figure 1. Concentration moyenne en TFA (ng/L) dans les eaux souterraines luxembourgeoises.

Chaque point représente un ouvrage échantillonné. La forme des points est déterminée par le type d'ouvrage et la couleur des points représente la concentration moyenne en TFA (ng/L).

Pour les points de mesures des eaux de surface, nous avons utilisé le « Luxembourg Catchment Information System » (LUCI-Tool) développé par le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) afin d'extraire l'ensemble des caractéristiques des bassins versants correspondant aux points de mesure du TFA dans les eaux de surface (**Figure 2**). Une liste des paramètres ainsi qu'une brève description est disponible en Annexe 1 de ce rapport.

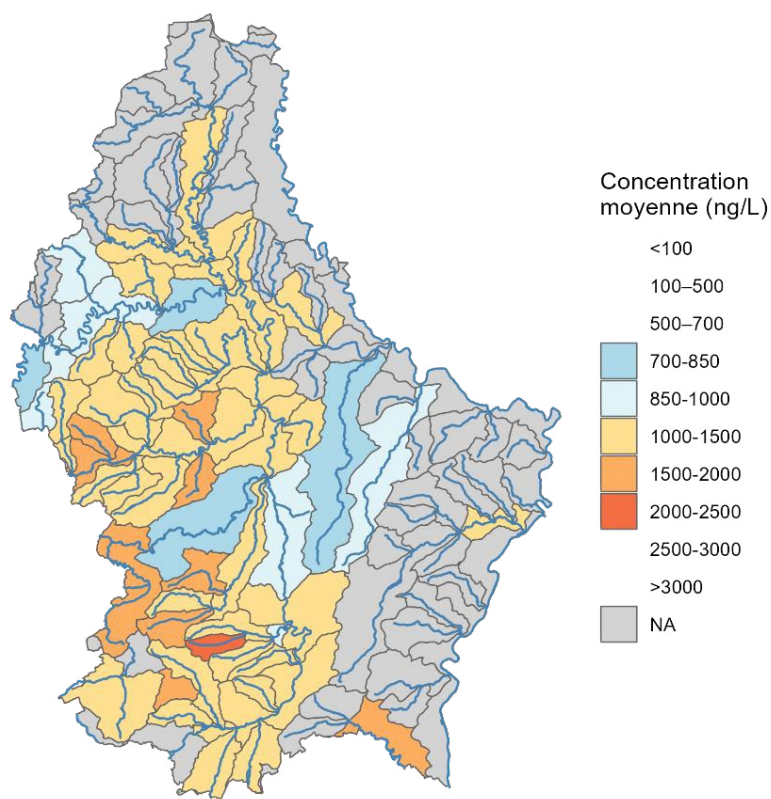


Figure 2. Concentration moyenne en TFA (ng/L) dans les eaux de surface au Luxembourg.

La concentration moyenne en TFA (ng/L) est représentée par masse d'eau de surface (OWK). L'échelle de couleur est identique à celle de la Figure 1. Les OWK grisés sont ceux pour lesquels l'AGE ne dispose pas de données actuellement. Les lignes bleues représentent le réseau hydrographique principal.

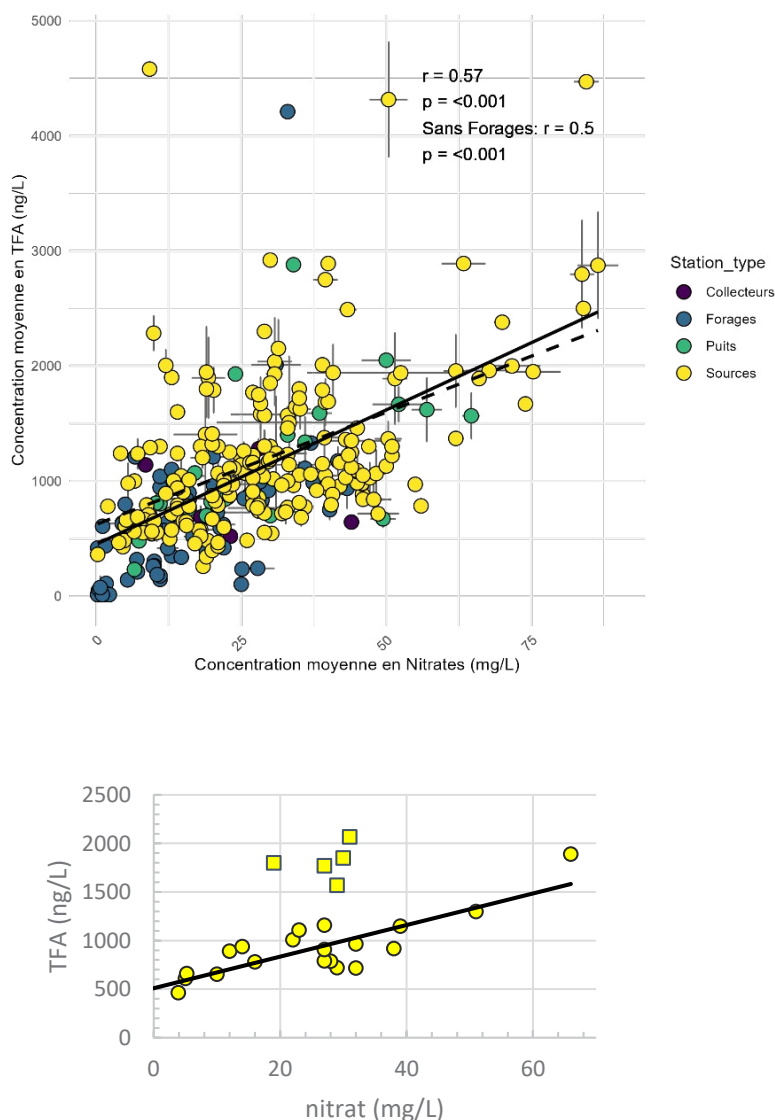
Résultats & Discussion

Eaux souterraine - Analyse non-spatialisée :

Afin d'étudier l'existence d'une influence de l'activité agricole sur les concentrations observées en TFA, l'analyse non-spatialisée se base sur la relation entre TFA et concentrations en nitrates, les nitrates étant considérés comme un **indicateur robuste de la pression agricole**. Cette approche révèle quatre éléments importants pour les eaux souterraines: **(i)** une corrélation positive et hautement significative ($p < 0.001$) des concentrations en TFA avec une pression agricole croissante définie ici par la concentration en nitrates, **(ii)** une concentration de fond de 450 à 625 ng/L non- expliquée par l'activité agricole, **(iii)** des concentrations en TFA très faibles pour certains forages profonds reflétant probablement une période de recharge de l'eau souterraine datant de plusieurs décennies lorsque les concentrations dans les précipitations étaient plus basses qu'à l'heure actuelle (Albers and Sültenfuss, 2024) et **(iv)** une variabilité substantielle des concentrations indépendamment de la pression agricole avec en particulier des sites présentant des valeurs plus élevées en TFA que ce qui pourrait être prédit par les teneurs en nitrates correspondantes.

La Figure 3 montre clairement une **relation hautement significative** entre les concentrations moyennes en nitrates par site échantillonné et les concentrations moyenne en TFA correspondantes, aussi bien pour l'ensemble des données disponibles (Panel du haut) pour les eaux souterraines qu'en utilisant un sous-ensemble correspondant à une région pédologique et géologique homogène (Panel du bas). On observe également que les concentrations les plus faibles en TFA se retrouvent presque exclusivement dans des forages d'observation ou des forages captages, et pas dans des captages de sources. Par conséquent, on peut poser l'hypothèse que ces valeurs basses correspondent à la valeur de TFA dans l'eau de recharge remontant à plusieurs années ou décennies, le décalage temporel étant dû à l'éloignement des fenêtres

de recharge des forages sous couverture (Albers and Sültenfuss, 2024). Ces valeurs très faibles en TFA ou inférieurs à la limite de quantification dans les forages profonds corrobore l'hypothèse de plusieurs auteurs affirmant qu'il **n'existe aucune donnée actuellement permettant de soutenir une source géologique naturelle de TFA** (Joudan et al., 2021) mais plutôt une **augmentation considérable des concentrations de TFA issues de diverses sources anthropiques au cours des dernières décennies** (Freeling et al., 2020 ; 2022 ; Pickard et al., 2020 ; Cahill et al., 2022).



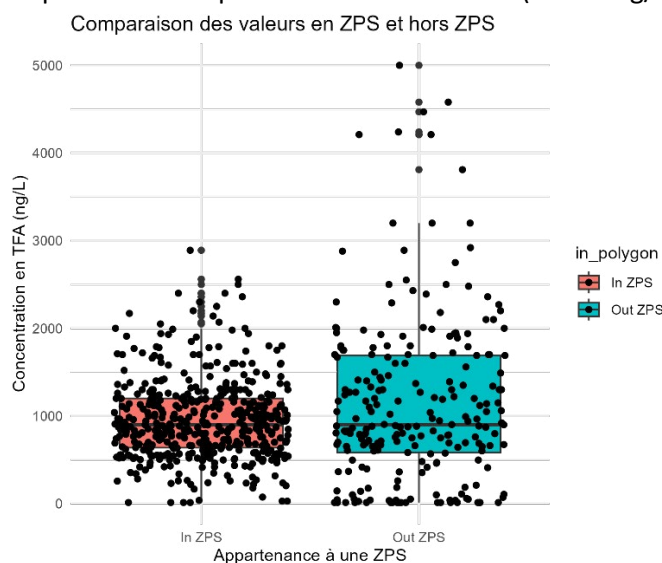
Lorsque la pression agricole devient faible voire nulle (teneurs en nitrates inférieurs à quelques mg/L), la tendance générale des concentrations en TFA ne s'approche pas de zéro. En effet, l'intercept varie entre **450 et 625 ng/L** si l'on considère ou non les forages dans la relation ou en calculant la droite avec un sous-ensemble de données correspondant à une seule région pédologiquement et géologiquement homogène. Ceci indique vraisemblablement **une ou plusieurs autres sources que l'agriculture** contribuant au TFA dans les eaux souterraines (source non-agricole). Les concentrations dans l'ensemble des sources disponibles (excepté source Ophélie 1) sur tout le territoire Luxembourgeois étant supérieures à 400 ng/L, il est très probable que cette concentration correspond à une valeur de fond qui trouve son **origine dans les dépôts atmosphériques**. Cette valeur correspond à la gamme de valeur pour les concentrations observées dans les précipitations en Allemagne en 2018-2019 avec une moyenne pondérée dans les

précipitations de 335 ng/L (Freeling et al., 2020). Le ministère de l'environnement luxembourgeois réalise actuellement des mesures de la concentration en TFA dans les précipitations au Luxembourg. Les résultats de cette étude permettront d'y voir plus clair, mais il est fort probable que les valeurs mesurées seront du même ordre de grandeur que celles mesurée en Allemagne, c'est-à-dire environ 400 ng/L. La valeur calculée maximum de l'intercept de 625 ng/L est donc probablement une surestimation de la contribution non agricole. Etant donné la variabilité importante observée dans la relation entre nitrates et TFA, une telle incertitude sur l'estimation de l'intercept est normale.

Enfin, cette première analyse démontre également une **variabilité importante des points autour de la relation TFA-NO₃⁻**, ce qui est habituel pour des mesures environnementales. Cette variabilité peut résulter de différents facteurs agronomiques (type de culture dans les aires d'alimentation des captages, différences d'applications des pesticides fluorés sur ces cultures, quantités de produits vétérinaires fluorés issus des engrais organiques épandus sur les surfaces agricoles ou déposé via les déjections directes des animaux lors du pâturage), pédologique, géologiques ou autres. L'influence de ces facteurs est évidente en comparant les deux panels de la figure 3. Lorsqu'un sous-ensemble regroupant les sites d'une seule région homogène pédologiquement, géologiquement et probablement agronomiquement parlant, est utilisé pour la régression, la dispersion autour de la droite de régression diminue largement (figure 3, panel du bas). Néanmoins, deux groupes de sites d'échantillonnage se détachent de la régression : un groupe de captages de sources entre 35 et 50 mg/L de nitrates présentant des valeurs en TFA plus basses que ce qui est prédit par la droite de régression (**groupe 1**) et à l'inverse des sites (sources, puits et un forage) où les valeurs en TFA sont plus élevées que prédites par les teneurs en nitrates (2000 ng/L et plus, **groupe 2**). Un décalage aussi systématique de ces deux groupes indique un facteur agricole plus spécifique que celui représenté par le lessivage moyen des nitrates. Le **groupe 1** pourrait être expliqué par une présence d'une source de nitrates plus importante que la source agricole correspondante en TFA, par exemple plus de prairies permanentes que de terres arables dans l'hypothèse où le TFA viendrait principalement de la dégradation de produits phytosanitaires fluorés. Le **groupe 2** pourrait lui être dû à une dénitrification locale plus importante dans le sous-sol que pour les autres sites amenant un décalage systématique des concentrations en nitrates vers des valeurs plus basses que celles correspondant à la pression agricole réelle. Ces deux cas sont actuellement étudiés plus avant en utilisant une approche isotopique dont les résultats devraient être disponible sous peu.

Eaux souterraine - Analyse spatialisée :

La comparaison des teneurs en TFA mesurées au sein des zones de protections d'eau potable avec celles mesurées hors de zones de protections révèlent que la valeur médiane est quasiment la même, mais que les quantifications particulièrement élevées (> 3000 ng/L) ont toutes eu lieu hors des périmètres des zones



de protections (Figure 4). Cette observation laisse à penser qu'une réglementation plus stricte en termes d'application de substances phytosanitaires, d'épandage, de stockage et de transport de produits chimiques semble empêcher l'apparition de concentrations extrêmes en TFA dans les ouvrages d'eau souterraine.

Figure 4. Boxplots des concentrations mesurées en TFA (ng/L) au sein des ZPS et hors ZPS. Chaque point représente un échantillon. La barre horizontale à l'intérieur de la boîte représente la médiane (50ème percentile). Les bords de la boîte représentent le premier quartile (25ème percentile) et le troisième quartile (75ème percentile). Les "moustaches" (whiskers) s'étendent jusqu'à 1,5 fois l'écart interquartile (IQR).

L'analyse spatialisée nécessite de connaître l'aire d'alimentation de chacun des captages, ce qui exclut l'ensemble des données mesurées hors des ZPS dès lors que les aires d'alimentation de ces captages n'ont pas encore été déterminées. Une part importante des forages n'ayant pas encore été affectée par le TFA dû au décalage temporel de la recharge (Albers and Sültenfuss, 2024), les concentrations mesurées dans ces ouvrages ne représentent pas à l'heure actuelle l'occupation et l'utilisation du sol de leurs aires d'alimentation. Par conséquent, l'ensemble des forages sont également exclu de l'analyse. La base de données disponible actuellement est donc constituée de 91 aires d'alimentations associées à des captages de sources et/ou puits pour lesquels des mesures de TFA ont été effectuées (Figure 5).

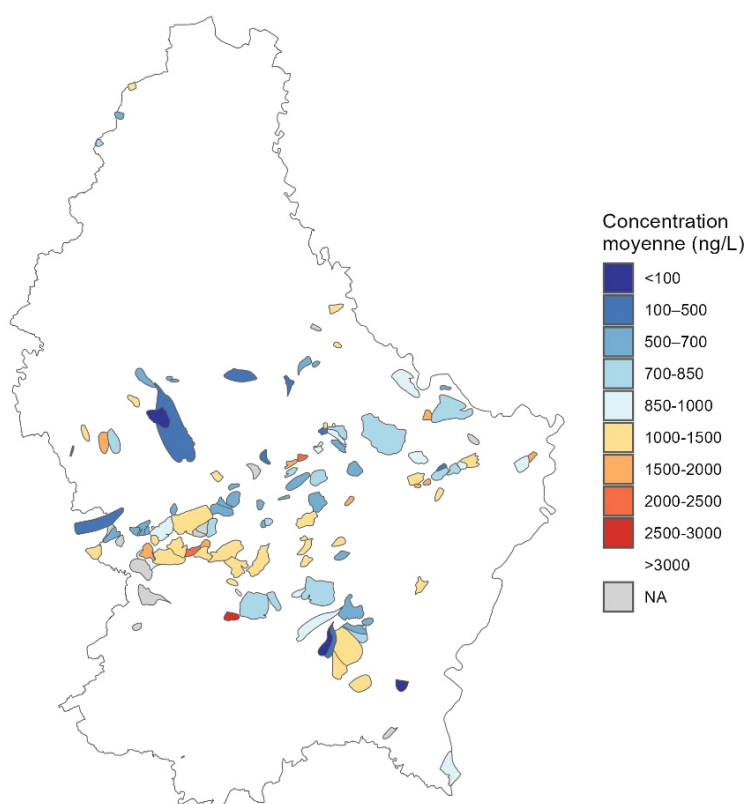


Figure 5. Concentration moyenne en TFA (ng/L) dans les aires d'alimentation de captage des eaux souterraines luxembourgeoise.

Chaque polygone représente une aire d'alimentation de captage. Le gradient de couleur indique la concentration moyenne dans les ouvrages associés à chaque aire d'alimentation incluant les sources, les puits et les forages. Les polygones grisés représentent les aires d'alimentation de captage pour lesquels l'AGE ne dispose actuellement pas de mesure du TFA.

Qualitativement, l'analyse spatialisée rejoint l'analyse non-spatialisée des eaux souterraines. Cette dernière révèle huit corrélations significatives entre la concentration moyenne en TFA dans les captages sources et l'occupation et l'utilisation du sol au sein des aires d'alimentation de captage. La Figure 6 présente quatre corrélations entre le pourcentage de surface agricole ou le pourcentage de surface forestière dans l'aire d'alimentation et la concentration

moyenne en TFA dans l'eau souterraine. On remarque que les corrélations restent **cohérentes** indépendamment de la base de données spatiale utilisée, mais que la dispersion des points autour de la droite de régression et donc l'**incertitude quantitative** est importante. Il faut par conséquent garder en mémoire que l'analyse spatialisée reste pour le moment qualitative. Notons également que l'analyse de corrélation n'indique pas d'impact significatif du « *Share of global coverage of catchment area of sealed land cover* » (CORINE), du « *Share of national coverage of catchment area of constructed land cover* » (LAND COVER), du « *Share of national coverage of catchment area of settlement land use* » (LAND USE), ou du « *Share of national coverage of catchment area of transport land use* » des AAC sur les concentrations moyennes en TFA et qui pourraient tous indiquer d'une certaine façon un impact industriel ou urbain.

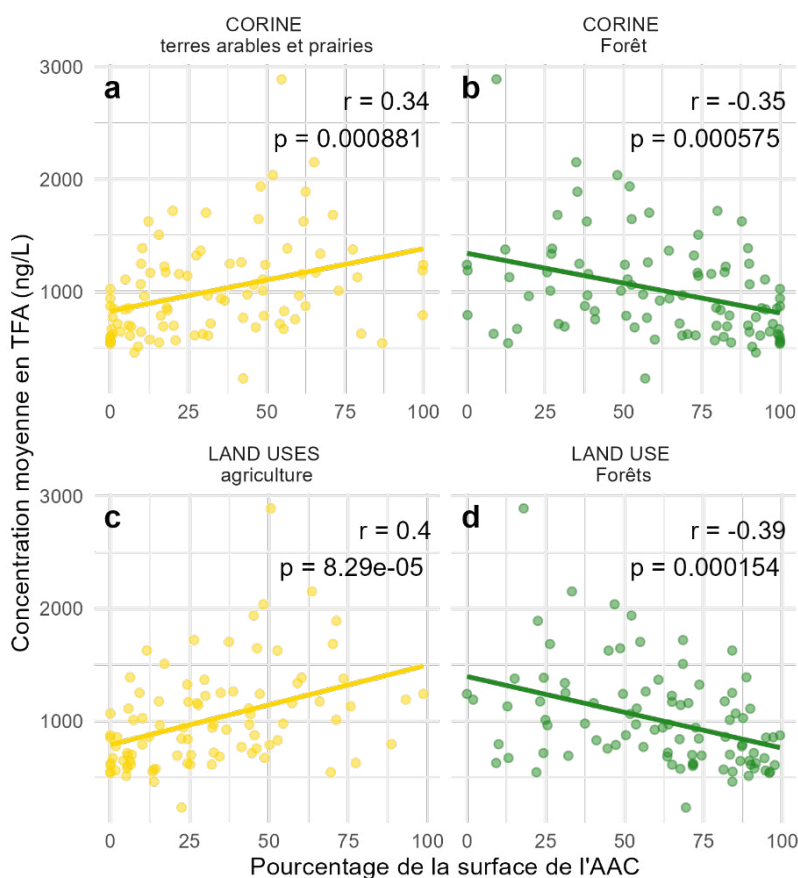


Figure 6. Corrélations linéaires entre le pourcentage de surfaces agricole (jaune) ou le pourcentage de surface forestières (vert) des aires d'alimentations de captage sources et les concentrations moyenne en TFA (ng/L). Chaque point représente une aire d'alimentation. Les droites représentent les régressions linéaires. Les coefficients de corrélation (r) et les p-valeurs (p) sont indiqués sur chaque panel. Les données spatiales des panels a et b proviennent de CORINE, et de LAND USE pour les panels c et d (voir Tableau 1 et annexe 1).

Les régressions linéaires présentent des caractéristiques extrêmement similaires que les données spatiales soit issues de Corine Land Cover 2020 ou de Land use/Land cover 2018 (respectivement 2 et 4 dans le Tableau 1). On observe que **les concentrations en TFA dans les sources augmentent**

significativement avec le pourcentage de surface agricole de l'AAC, représenté par *"Share of global coverage of catchment area of arable and grass land cover"* de CORINE (panel a, $r = 0.34$, $p\text{-value} = 0.0009$, pente = 5.54), par *"Share of national coverage of catchment area of agriculture land use"* de LAND USE (panel c, $r = 0.4$ $p\text{-value} < 0.0001$, pente = 7.09). A l'inverse, **les concentrations en TFA dans les sources diminuent significativement avec le pourcentage de surface forestière de l'AAC**, représenté par *"Share of global coverage of catchment area of forest land cover"* de CORINE (panel b, $r = -0.35$, $p\text{-value} = 0.0006$, pente = -5.31), ou par *"Share of national coverage of catchment area of forest land use"* de LAND USE (panel d, $r = -0.39$, $p\text{-value} = 0.0002$, pente = -6.37). Les valeurs des intercepts sont également cohérentes entre les différentes corrélations et varient entre 760 et 830 ng/L pour des AAC qui présenteraient des pourcentages de surface agricole de 0% ou des pourcentages de forêt de 100%. Cette valeur de fond est dans la même gamme que la valeur de 625 ng/L déterminé via l'indicateur nitrate sans les forages, mais étant donné l'importante dispersion des valeurs autour des droites de régression, il n'est pas à exclure qu'il s'agisse d'une légère surestimation de la déposition atmosphérique (voir la discussion sur le sujet dans la partie **«Eaux souterraine - Analyse non-spatialisée »**).

L'impact de la pression agricole étant avéré, il est intéressant de constater que l'analyse de corrélation sur base des données FLIK indique **une augmentation des concentrations moyennes en TFA avec le pourcentage de surface dédié aux cultures de céréales d'hiver** (Figure 7, panel a) et **aux cultures d'oléagineux** (Figure 7, panel b). La corrélation entre *"Share of national coverage of catchment area of winter cereals crops"* et la concentration moyenne en TFA présente une p-valeur extrêmement significative ($p\text{-val} < 0.0001$) et un coefficient de corrélation de 0.42 (Figure 7). La corrélation entre *"Share of national coverage of catchment area of oilseeds crops"* et la concentration moyenne en TFA présente une p-valeur plus faible mais toujours significative ($p\text{-val} = 0.006$) et un coefficient de corrélation de 0.28.

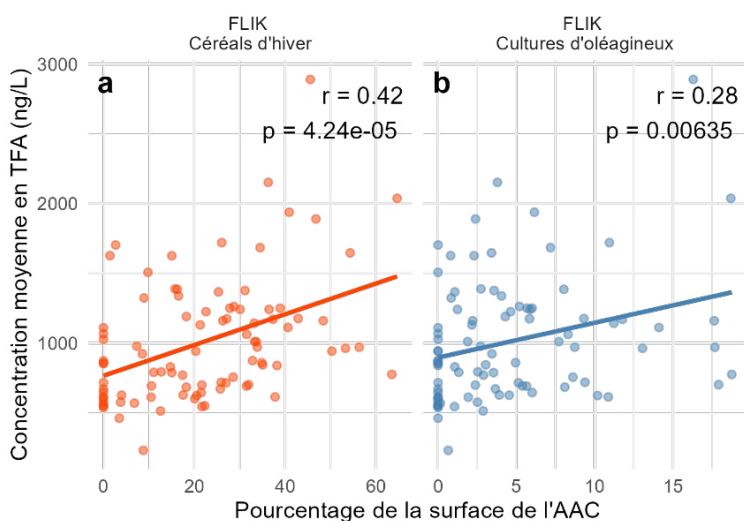


Figure 7. Corrélations linéaires entre le pourcentage de surfaces dédiées à la culture des céréales d'hiver (orange, panel a), et d'oléagineux (bleu, panel b) des aires d'alimentations de captage sources et les concentrations moyenne en TFA (ng/L). Chaque point représente une aire d'alimentation. Les droites représentent les régressions linéaires. Les coefficients de corrélation (r) et les p -valeurs (p) sont indiqués sur chaque panel. Les données spatiales proviennent des données FLIK (voir Tableau 1 et annexe 1).

Parmi les 25 substances actives de pesticides produisant du TFA autorisées en date du 1er mai 2025, 12 sont applicables sur les céréales d'hiver, dont le Flufénacet et le Diflufenican, les pesticides fluorés les plus utilisés en masse par hectare en culture céréalière. En date du 1er mai 2025, seul le Fluopyram était utilisable sur les cultures de colza d'hiver. Il est à noter que comme pour la figure 6, la dispersion des points autour de la droite de régression reste substantielle, indiquant vraisemblablement des sources multiples de TFA au sein des AAC. Il est également probable que d'autres pesticides fluorés puissent contribuer en quantité variable d'une aire d'alimentation à l'autre, et pourrait expliquer en partie les variations autour des différentes droites de régression observées.

Eaux de surface - Analyse non-spatialisée :

L'analyse du TFA dans les eaux de surface a débuté en 2018 au Luxembourg via les campagnes d'analyses des substances prioritaires. Ainsi, vingt stations ont été échantillonnées depuis 2018 et le TFA a pu être quantifié dans chacune d'entre elles. En moyenne, on retrouve le TFA à hauteur de 1135 ng/l dans les eaux de surface luxembourgeoise. Le maximum détecté est de 8000 ng/l en juillet 2025 au niveau de Helfent sur la Grouf.

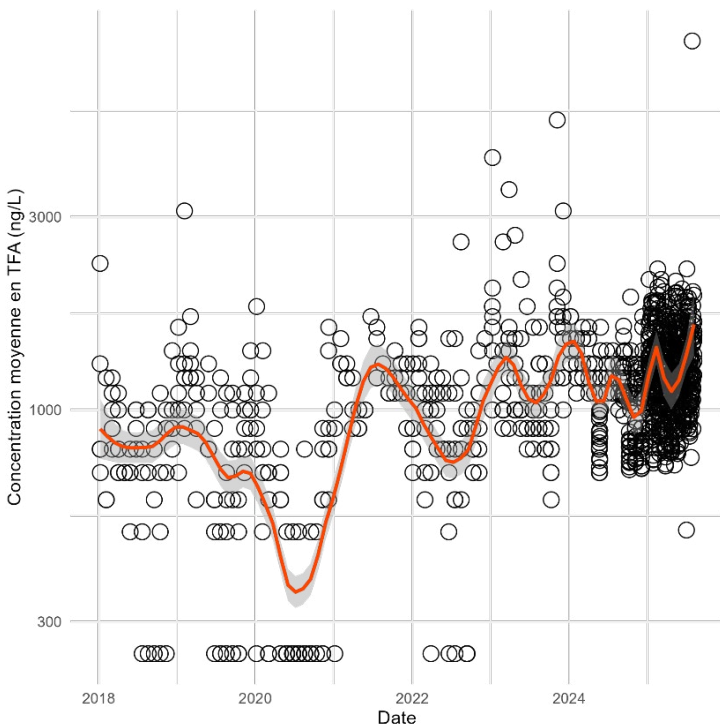


Figure 8. Concentrations en TFA (ng/L) dans les eaux de surface luxembourgeoises au cours du temps. Chaque point représente un échantillon. La courbe orange représente la régression « loess » avec un paramètre $\text{span} = 0.1$. La zone grisée représente l'erreur standard autour de la régression. L'axe Y (concentration en TFA) est exprimé en échelle logarithmique.

Depuis mi-2024, le TFA est entré dans le monitoring opérationnel du laboratoire de l'AGE et le nombre de quantifications du TFA dans les eaux de surface a dès lors grandement augmenté. Le monitoring opérationnel de l'AGE s'étale sur un cycle de 3 ans, avec un tiers des cours d'eau du pays échantillonné chaque année, par zone géographique. Cela implique que nous ne disposerons pas d'une couverture géographique complète des valeurs de TFA dans les eaux de surface

avant mi-2027. Une première analyse peut néanmoins être effectuée en gardant en tête une certaine précaution d'interprétation due à cette limite.

En analysant l'ensemble des données au cours du temps, on peut observer une certaine temporalité des concentrations (Figure 8). Néanmoins, cette temporalité est partiellement masquée par le fait que les stations échantillonnées sont variables d'une année à l'autre. On peut toutefois distinguer des cycles annuels qui semble présenter des valeurs élevées durant les mois d'hiver qui redescendent au printemps et remontent ensuite progressivement à partir de juin.

Cette tendance ne semble pas directement liée au débit des cours d'eau car aucune corrélation ($r=-0.05$, $p\text{-val}=0.11$) n'est identifiable entre la concentration en TFA et la conductibilité électrique utilisé comme indicateur du débit. Cette variabilité temporelle trouve certainement sa source dans la combinaison de plusieurs facteurs tels que **la dégradation de pesticides fluorés contenant le groupe C-CF₃**, appliqués à l'automne et **la mobilisation du TFA en hiver**, et **l'augmentation des dépôts atmosphériques sous l'effet des UV durant les mois ensoleillés** comme observés dans les précipitations en Allemagne (Freeling et al., 2020). Les autres sources potentielles (stations d'épuration, rejets industriels) sont a priori stable au cours de l'année, voir diluées en période de hautes eaux.

Eaux de surface - Analyse spatialisée :

Au contraire des eaux souterraines, aucune corrélation ($r=-0.01$, $p\text{-val}=0.7$) entre la concentration en TFA et la concentration en nitrates n'est observée dans les eaux de surface. Cela s'explique vraisemblablement par les sources multiples tant du TFA que des nitrates dans les cours d'eau ainsi que par la taille importante des bassins versants. Néanmoins, l'analyse des caractéristiques des bassins versants de chacun des points de mesure des eaux de surface nous en apprend plus sur les leviers influençant les concentrations en TFA dans les cours d'eau. Actuellement, l'AGE dispose de quantifications de TFA à 90 L-codes différents étant situés dans 62 OWK uniques. Rappelons que seul un tiers des cours d'eau du pays est échantillonné chaque année, ce qui n'offre pour l'instant pas une couverture totale. L'analyse spatiale permet de révéler plusieurs corrélations significatives, en gardant néanmoins en tête que la dispersion autour des droites de régression est importante, et par conséquent, les conclusions pouvant être tirée de l'analyse de corrélations sont pour l'instant de nature plus qualitative que quantitative. Comme pour les eaux souterraines, **les pourcentages de surfaces agricoles et forestières jouent un rôle majeur pour expliquer les concentrations moyenne en TFA dans les cours d'eau (Figure 9).**

A nouveau, les résultats sont cohérents qu'ils soient issus de Corine Land Cover 2020 ou de Land use/Land cover 2018 (respectivement 2 et 4 dans le Tableau 1). On observe que les concentrations en TFA dans les cours d'eau augmentent significativement avec le pourcentage de surface agricole des bassins versants, représenté par "Share of global coverage of catchment area of arable and grass land cover" de CORINE (panel a, $r = 0.42$, $p\text{-val} < 0.0001$), par "Share of national coverage of catchment area of agriculture land use" de LAND USE (panel c, $r = 0.29$, $p\text{-val} = 0.005$).

De façon cohérente, les concentrations en TFA dans les cours d'eau diminuent significativement avec le pourcentage de surface forestière des bassins versant, représenté par "Share of global coverage of catchment area of forest land cover" de CORINE (panel b, $r = -0.42$, $p\text{-value} < 0.0001$) ou par "Share of national coverage of catchment area of forest land use" de LAND USE (panel d, $r = -0.29$, $p\text{-value} = 0.005$).

Les valeurs des intercepts sont également cohérentes entre les différentes corrélations et varient entre 545 et 890 ng/L pour des bassins versant qui présenteraient des pourcentages de surface agricole de 0% ou des pourcentages de forêt de 100%. L'analyse des pentes révèle une **augmentation de la concentration moyenne en TFA de 6 à 10 ng/L par pourcent de la surface du bassin versant dédiée à l'agriculture** (CORINE = $10 \text{ ng L}^{-1} \%^{-1}$, LAND USE = $6 \text{ ng L}^{-1} \%^{-1}$). Ainsi, en considérant qu'environ 50% du territoire luxembourgeois est consacré à l'agriculture, on peut émettre l'hypothèse qu'en moyenne 300 à 500 ng/L ($10 \text{ ng/L} \times 50\%$ du territoire) de la concentration moyenne en TFA dans les cours d'eau provient de surfaces agricoles. La concentration moyenne nationale dans les cours d'eau étant également environ

de 1000 ng/L, l'origine agricole apparaît comme responsable pour 30 à 50 % de cette valeur.

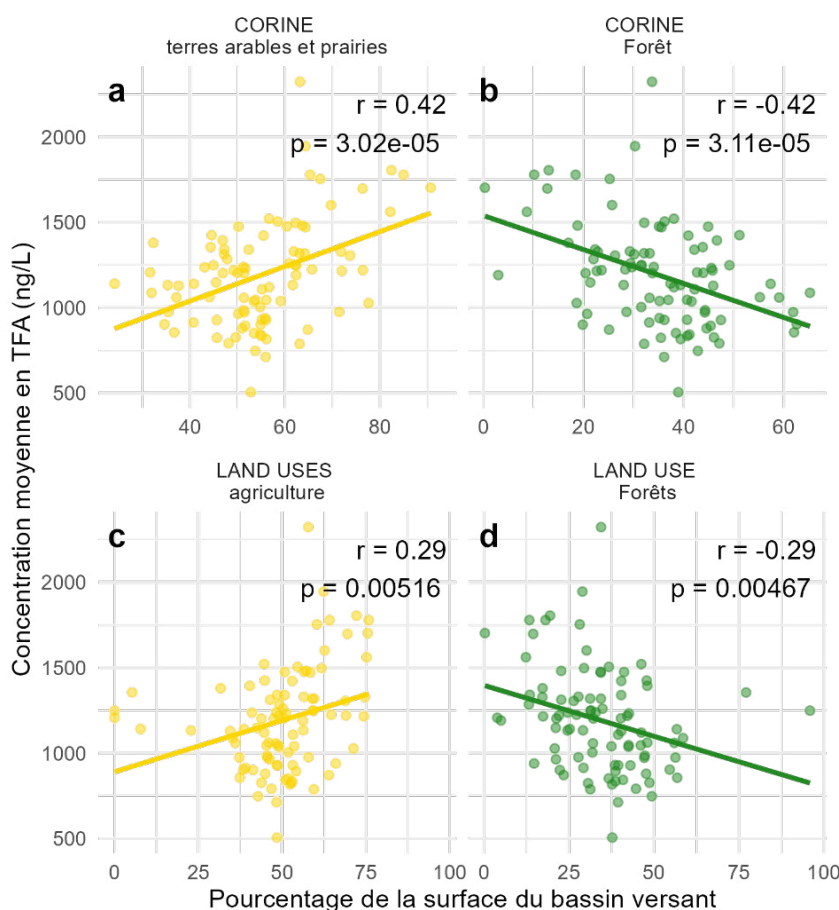


Figure 9. Corrélations linéaires entre le pourcentage de surfaces agricole (jaune) ou le pourcentage de surface forestières (vert) des bassins versants et les concentrations moyenne en TFA (ng/L). Chaque point représente un bassin versant. Les droites représentent les régressions linéaires. Les coefficients de corrélation (r) et les p -valeurs (p) sont indiqués sur chaque panel. Les données spatiales des panels a et b proviennent de CORINE, des panels b et c de LAND USE et des panels e à h de LAND COVER (voir Tableau 1 et annexe 1).

Parmi les corrélations significatives avec la concentration moyenne en TFA dans les cours d'eau figurent également les suivantes : surface globale du bassin versant ($r = -0.34$, $p = 0.001$) pourcentage de géologie du Lias ($r=0.35$, $p<0.001$), pourcentage de géologie du Keuper ($r=0.3$, $p=0.0036$), pourcentage de géologie du Lias ($r=0.34$, $p<0.001$), pourcentage de géologie de l'Oesling ($r=-0.42$, $p<0.0001$), pourcentage du bassin versant couvert par de l'eau ($r=-0.33$, $p=0.0014$), pente moyenne du bassin versant ($r=-0.44$, $p<0.0001$), pente maximale du bassin versant ($r=-0.48$, $p<0.0001$), Débit moyen ($r=-0.38$, $p=0.0002$), Débit moyen par temps sec ($r=-0.3$, $p=0.0035$), Débit naturel moyen ($r=-0.38$, $p<0.001$), Débit naturel moyen par temps sec ($r=-0.32$, $p=0.0018$), pourcentage du bassin versant des sols de l'Oesling ($r=-0.42$, $p<0.0001$), pourcentage du bassin versant de sols loessiques ($r=0.23$, $p=0.025$), pourcentage du bassin versant de sols argileux ($r=0.33$, $p=0.0011$), pourcentage du bassin versant de sols colluvionnaires ($r=0.28$, $p=0.0065$), pourcentage du bassin versant de sols limono-pierreux ($r=0.3$, $p=0.0037$).

Toutes ces corrélations n'ont pas forcément d'explications logiques ou de base mécaniste mais peuvent simplement être le reflet d'une certaine colinéarité entre les différentes variables. Ainsi il semble que la géologie et la pédologie de l'Oesling présentent des concentrations en TFA plus faibles, mais ceci peut simplement être le reflet de pratiques agricoles différentes sur ces types de sol. De la même façon, les

bassins versant les plus pentus sont généralement situés dans l'Oesling. Ainsi, l'effet de la pente peut également être confondu avec d'autres effets.

Les résultats de cette section suggèrent un impact similaire des surface agricoles sur les eaux de surface à celui sur les eaux souterraines. Les bassins versants des points de mesures des eaux de surface étant nettement plus vastes que les aires d'alimentation des captages d'eau souterraine, l'analyse spatiale sur base des données FLIK ne révèle aucune corrélation significative d'un type de culture en particulier. Néanmoins, une analyse plus approfondie et plus détaillée permettrait certainement de mettre en lumière les différences entre terres arables et prairies permanentes. En effet, bien que les prairies ne soient généralement pas traitées par des produits phytopharmaceutiques d'où peut provenir un part du TFA, elles sont amendées avec des fertilisants organiques qui contiennent en toute vraisemblance du TFA issu de l'eau, de l'alimentation ou encore des traitements vétérinaires appliqués aux bovins. De plus, ces **prairies sont souvent situées à proximité immédiate des cours d'eau**, ce qui favorise l'érosion vers les rivières. **Les sols des prairies, généralement plus compacts, moins profonds et riches en matière organique, accentuent ce phénomène d'érosion.** Les données temporelles montrent également que les concentrations dans les cours d'eau culminent en hiver, période durant laquelle l'érosion est la plus intense. L'hypothèse d'un impact des fertilisants organiques sur la contamination au TFA des eaux de surface est pour l'AGE une piste d'investigation prioritaire.

Enfin, on peut s'attendre à une augmentation progressive des concentrations en TFA dans les eaux souterraines et les eaux de surface en raison de l'augmentation des apports atmosphériques. En effet, de récentes études montrent **une augmentation des émissions anthropiques de précurseurs gazeux du TFA**, entraînant un dépôt atmosphérique croissant de TFA dans l'hémisphère Nord au cours des trois dernières décennies (Freeling et al., 2023). Il est attendu que la formation et le dépôt atmosphériques de TFA augmentent fortement dans les années à venir, passant d'environ 9 kilotonnes en 2015 à environ 40 kilotonnes en 2030, en raison de la hausse des émissions mondiales de réfrigérants fluorés, mais aussi en lien avec le passage à la dernière génération de réfrigérants, à savoir les HFO (Hydrofluoro-oléfinés) (Behringer et al., 2021). Holland et al. (2021) ont indiqué que la transition du HFC-134a vers le HFO-1234yf (en supposant une consommation équivalente) **entraînerait une augmentation de 33 fois de la charge atmosphérique mondiale en TFA**, car la dégradation du second se produit à un rythme plus rapide et avec un rendement en TFA plus élevé.

Les gaz fluorés sont principalement utilisés dans les systèmes de climatisation automobile, les agents gonflants pour mousses isolantes et les aérosols. Ces substances sont aussi présentes dans de nombreux mélanges de réfrigérants modernes. Le secteur du froid est le principal utilisateur de gaz fluorés, avec une majorité des émissions se produisant durant la phase d'utilisation. Au sein de l'Union européenne, ces risques sont encadrés par le Règlement (UE) 2024/573, qui établit des règles strictes en matière de gestion des gaz fluorés, notamment le confinement, l'utilisation, le recyclage, la régénération et la destruction, ainsi que la certification et la formation à leur manipulation. Toutefois, ces exigences ne sont pas nécessairement appliquées dans d'autres pays. Aussi, les systèmes de climatisation des voitures en fin de vie, dont une grande partie est exportée hors de l'UE sans traitement approprié, contribuent fortement à ces émissions. Les réfrigérants non récupérés s'échappent alors dans l'atmosphère, générant des quantités importantes de TFA.

Face à ce constat, il devient urgent de promouvoir des alternatives qui ne produisent pas de TFA. Des solutions halogène-free comme le dioxyde de carbone (CO₂), les hydrocarbures (comme le propane) ou l'ammoniac sont déjà disponibles sur le marché et offrent une efficacité énergétique comparable. Bien que le u-HFC-1234yf soit devenu une norme dans la climatisation des voitures, les technologies émergentes, notamment dans le domaine des véhicules électriques, pourraient permettre une transition vers des systèmes sans halogènes. D'autres secteurs, comme la réfrigération stationnaire, commencent également à adopter des technologies sans fluor. Néanmoins, il convient de souligner que ces nouvelles techniques utilisant des gaz naturels présentent des risques alternatifs, plus immédiats, qui doivent être

pris en compte, notamment leur inflammabilité et la nécessité d'exploiter les systèmes sous haute pression. Cependant, cette transition est freinée par des considérations économiques et un manque d'incitations fortes. Dans le but de limiter les impacts environnementaux à long terme dû au TFA, **les solutions sans fluor devraient être systématiquement privilégiées**, malgré les contraintes techniques.

Limites de l'étude et réserves d'interprétation

Au-delà d'ouvrir certaines pistes de réflexions sur l'origine du TFA dans les eaux au Luxembourg, cette première analyse a également permis de mettre en lumière certaines lacunes dans le monitoring actuel du TFA. Ces lacunes impliquent également que certaines hypothèses sur l'origine de la contamination au TFA ne peuvent être confirmée en l'état actuel et oblige à émettre certaines réserves d'interprétation. Les différentes limites et réserves sont discutées ci-dessous :

1- Aspect actuel des données spatiales :

L'ensemble des données spatiales sont de hautes qualités et de nombreux contrôles manuels ont été effectués afin de confirmer l'appartenance d'un certain nombre de parcelles à une telle ou telle classe. Néanmoins, les données utilisées les plus récentes dates de 2020 alors que les données agricoles associées aux parcelles FLIK sont des moyennes de la période 2005-2015. Les temps de recharges des aquifères étant très variables, il n'est pas impossible que les données disponibles actuellement ne soient localement pas ou plus représentatives de situation actuelle. Si l'on peut être confiant que la classification entre les prairies temporaires (terres arables et prairies de moins de 5 ans) et les prairies permanentes n'a pas radicalement changées au cours des dernières années, c'est moins le cas en ce qui concernent les types de cultures tels que les oléagineux, les céréales d'hiver, le maïs fourrager, etc.

2- Qualité des données physico-chimiques

Le monitoring du TFA ayant débuté relativement récemment, on ne peut pas exclure que les concentrations moyennes déterminées actuellement ne soient pas parfaitement représentatives. Dans le cas des eaux souterraines, le nombre de mesures par station n'est en moyenne que de deux. Pour près des deux tiers des ouvrages, une seule valeur est actuellement disponible. Davantage de mesures équidistantes durant la saison hydrologique sont nécessaires pour assurer la robustesse des valeurs moyennes. Dans le cas des eaux de surfaces, c'est le rythme triennal du monitoring qui implique que certaines parties du pays n'ont pas encore été échantillonnées, et que d'autre ne l'ont été que sur une partie de la saison hydrologique.

3- Manque des données dans certains compartiments

A l'heure actuelle, l'impact des **apports des stations d'épurations** dont les sources de TFA sont l'eau potable et le TFA contenu dans les denrées alimentaires et les médicaments potentiels ne peut pas encore être quantifié par manque de données. L'absence de quantification du **TFA dans les précipitations** ne permet que d'estimer la part de la concentration issue des précipitations via les intercepts des régressions mais ne peut pas encore être confirmée par des données mesurées. L'impact de la **fertilisation organique** et son rôle dans l'enrichissement potentiel des prairies reste pour l'instant au stade d'hypothèse par manque de quantification du TFA ou de ces précurseurs dans les fumiers, les lisiers et les fourrages.

4- Incertitudes sur les voies de dégradation du Flufénacet en TFA

Bien que la littérature indique un rôle clé du flufénacet dans la contamination des eaux en TFA (Nödler et al., 2020 ; Joerss et al., 2024), les données disponibles pour le Luxembourg ne permettent actuellement pas de le mettre en lumière. En effet, les doses appliquées agrégées par zone de protection d'eau potable ne sont disponibles pour la saison culturale 2023-2024 que pour un nombre restreint de ZPS et de manière partielle. Dans le cadre d'un groupe de travail sur les pesticides, les métabolites du flufénacet (-ESA avec DT50 de 300 jours) ont été quantifiées dans les eaux souterraines. Or, à l'heure actuelle, ceux-ci n'ont pas

pu être identifiés simultanément avec le TFA dans les eaux souterraines ce qui – en tenant compte du décalage dû au temps de transit/résidence- fragilise actuellement le lien entre les teneurs en TFA et le pesticide candidat principal en cause comme source. Des études complémentaires portant sur l'ensemble des métabolites potentiels du Flufénacet et des 24 autres produits phytopharmaceutiques autorisés au Luxembourg et susceptibles de générer du TFA contribueraient à élucider les mécanismes d'apparition du TFA dans les sols agricoles

Perspectives

La contamination au TFA étant une problématique globale mais dont un nombre important de composantes restent inconnues, il semble essentiel d'intensifier nos efforts afin de mieux caractériser ces voies d'entrées dans l'environnement. Ainsi, nous identifions ci-dessous les points clés à cibler au plus vite :

1- Une étude spatiale sur base des **données FLIK à jour (2020-2025)**

L'administration des services technique de l'agriculture (ASTA) dispose des données FLIK les plus récentes et pourrait ainsi répéter l'analyse spatiale présentée dans ce rapport sur base de ces données actualisées. Ces données permettraient également d'aller plus loin dans la compréhension du rôle de chacune des cultures et pratiques associées.

2- Une campagne de mesure du **TFA dans les précipitations**

L'échantillonnage est l'analyse du TFA dans les eaux de pluie présentent certains défis techniques et opérationnels mais permettraient d'obtenir une vision plus claire de la proportion des concentrations de TFA issus des dépositions atmosphériques, ainsi que de la variabilité spatiale et temporelle de ces apports. Une étude en collaboration AGE-AEV doit être mise en place à ces fins

3- Une campagne de mesure des **pesticides-PFAS et de leur métabolites (non-target)**

Il semble aujourd'hui essentiel d'investiguer le cycle de vie de ces pesticides dans les sols et l'eau afin de comprendre et de prédire l'impact futur des pesticides appliqués depuis plusieurs années en et hors ZPS. Un projet de recherche impliquant la chambre d'agriculture, l'ASTA, l'AGE et l'AEV apparait comme une nécessité absolue et un effort commun à mettre en place au plus vite.

4- Une campagne de mesure du **TFA dans les fertilisants organiques** (fumiers et purins) et dans les fourrages

La bioaccumulation du TFA (et des PFAS en général) par les plantes agricoles a été démontrées sur un nombre important de cultures présentes au Luxembourg (Zhang et al., 2019 ; Lesmeister et al., 2021). Ainsi, le lien entre la présence du TFA dans l'eau et les fourrages et la présence du TFA dans les fertilisants organiques apparait comme trivial. Une campagne de mesure du TFA dans les différents types de fertilisants organiques doit permettre de mettre en lumière ce levier potentiel de contamination des eaux et d'élucider l'origine du TFA dans ces fertilisants essentiels au secteur agricole.

5- Une étude sur **l'origine du TFA atmosphérique**

De nombreuses publications scientifiques sont d'ores et déjà disponibles à ce sujet et une étude bibliographique approfondie devrait permettre d'identifier les sources les plus plausibles et leurs contributions afin de prioriser les actions à mener.

6- Une campagne de mesure du **TFA dans les effluents de station d'épuration**

Des mesures de la concentration en TFA dans les eaux à l'entrée et à la sortie des stations d'épurations permettraient d'évaluer la proportion de TFA rejetée dans les cours d'eau depuis les stations d'épuration. Particulièrement, il serait intéressant de quantifier la création potentielle de TFA à partir des différents précurseurs au sein des stations d'épuration.

Conclusion :

En l'état actuel et avec les données disponibles, la présente analyse permet de conclure qu'il existe une **concentration de fond d'environ 500 à 800 ng/l en TFA** (800 ng/L étant une estimation haute potentiellement due aux incertitudes des régressions) dans les eaux souterraines et les cours d'eau luxembourgeois, issue vraisemblablement de **dépôts atmosphériques** depuis plusieurs décennies. Cette concentration de fond semble **légèrement plus élevée en moyenne dans les eaux souterraines** en raison d'une **accumulation** d'année en année. Cette origine atmosphérique représente, selon nos estimations, entre **50% et 70% de la contamination moyenne des eaux en TFA**. Les forages profonds ne semblent à l'heure actuelle pas encore avoir été affectés par cette source atmosphérique. Néanmoins, on peut s'attendre à un dépôt atmosphérique croissant de TFA et des concentrations de fond qui pourraient augmenter de façon importante tant dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface. Dès lors, **des mesures rapides pour limiter l'utilisation des gaz fluorés semblent essentielles**, notamment, en raison du caractère ubiquitaire du TFA, **au niveau international**.

Il existe également **indéniablement une contribution agricole d'environ 30% à 50 % en moyenne** (± 500 ng/L) dans la contamination par le TFA, mais pouvant être encore plus élevée dans les zones à forte pression agricole. Cette contribution est mise en lumière tant par la **relation non-spatialisée entre le TFA et les concentrations en nitrates** utilisées comme indicateur de la pression agricole que par les **données spatiales** traduisant plus directement les différents éléments de la pression agricole dans les aires d'alimentation de captage et dans les bassins versants des cours d'eau. Les sources agricoles exactes restent encore indéterminées (flufénacet, diflufenican ou autres substances actives précurseurs, épandage). Néanmoins, les **cultures céréalières d'hiver et d'oléagineux**, sur lesquels ou avant lesquelles sont communément appliqués des quantités substantielles de produits phytosanitaires fluorés, apparaissent comme une **source vraisemblable** de TFA dans les eaux souterraines.

Cette analyse a également permis de mettre en lumière **certaines lacunes dans notre monitoring** actuel du TFA, tels que l'absence de quantification du TFA dans les précipitations, dans les fumiers et lisiers ou dans les fourrages, l'absence de quantification dans certaines parties du pays du au rythme triennal de l'analyse des eaux de surface. Des données mesurées dans ces différents compartiments et sur l'ensemble du territoire luxembourgeois sont essentielles afin de pouvoir confirmer nos hypothèses actuelles.

Enfin, il existe **une variabilité importante** d'une aire d'alimentation à l'autre ou d'un bassin versant à l'autre normale avec ce type de données environnementales, qui peut au moins en partie s'expliquer par de **potentiels rejets ou ruissèlements industriels ponctuels**, ou par **des effluents urbains** qui ne peuvent pas être totalement exclus actuellement. Ce type de contaminations occasionnelles mais à très haute concentration pourrait bien expliquer les quantifications extrêmes observées ponctuellement. Enfin, les différences **géologiques et pédologiques** pourraient également expliquer une part de cette importante variabilité, tout comme les **différentes techniques culturales** visant à réduire l'application de produits phytopharmaceutiques, y compris ceux qui sont fluorés.

Le peu de données disponibles ne nous permet pas actuellement de mettre en lumière le rôle d'une substance active de pesticide en particulier dans la contamination des eaux souterraines au TFA. Les États membres de l'UE ayant définitivement adopté le non-renouvellement de l'approbation du flufénacet le 12 mars 2025, son usage, comme celui des 24 autres produits phytosanitaires contenant une sous-

structure C-CF₃ autorisés actuellement au Luxembourg devrait d'ores et déjà être réduit ou interdit par mesure de précaution en zone de protection d'eau potable, voir sur l'ensemble du territoire.

Le TFA restera dans l'environnement une fois qu'il y est libéré, en raison de sa persistance exceptionnellement élevée. Avec des émissions continues et croissantes de TFA provenant de multiples sources anthropiques, combinées à sa forte mobilité dans l'eau et les sols, à son important potentiel de transport sur de longues distances, ainsi qu'à l'absence de techniques de dépollution économiquement viables, les concentrations de TFA dans les différents compartiments de l'environnement pourraient continuer à augmenter. Par conséquent, en plus de la surveillance continue du TFA dans l'environnement, **le TFA et ses précurseurs devraient être envisagés pour une régulation** afin de minimiser le risque de contamination à l'avenir.

Références :

Albers, C. N., & Sültenfuss, J. A 60-Year Increase in the Ultrashort-Chain PFAS Trifluoroacetate and Its Suitability as a Tracer for Groundwater Age. *Environmental Science & Technology Letters* 2024, **11**(10), 1090-1095.

Behringer D, Heydel F, Gschrey B, Osterheld S, Schwarz W, Warncke K, Freeling F, Nödler K, Henne S, Reimann S, Blepp M, Jörß W, Liu R, Ludig S, Rüdenauer I, Gartiser S: Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential. German Environment Agency 2021. TEXTE 73/2021.

Björnsdotter MK, Yeung LWY, Kärrman A, Jogsten IE: Mass balance of perfluoroalkyl acids, including trifluoroacetic acid, in a freshwater lake. *Environ Sci Technol* 2022, 56:251–259. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04472>.

Björnsdotter MK, Hartz WF, Kallenborn R, Ericson Jogsten I, Humby JD, Kärrman A, Yeung LWY: Levels and seasonal trends of C1-C4 perfluoroalkyl acids and the discovery of trifluoromethane sulfonic acid in surface snow in the arctic. *Environ Sci Technol* 2021, 55:15853–15861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04776>.

Bowden DJ, Clegg SL, Brimblecombe P: The Henry's law constant of trifluoroacetic acid and its partitioning into liquid water in the atmosphere. *Chemosphere* 1996, 32:405–420. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00330-4](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00330-4).

Cahill TM: Increases in trifluoroacetate concentrations in surface waters over two decades. *Environ Sci Technol* 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01826>.

Chen H, Yao Y, Zhao Z, Wang Y, Wang Q, Ren C, Wang B, Sun H, Alder AC, Kannan K: Multimedia distribution and transfer of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) surrounding two fluorochemical manufacturing facilities in Fuxin, China. *Environ Sci Technol* 2018, 52:8263–8271. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00544>.

Freeling F, Behringer D, Heydel F, Scheurer M, Ternes TA, Nödler K: Trifluoroacetate in precipitation: deriving a benchmark data set. *Environ Sci Technol* 2020, 54:11210–11219. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02910>.

Freeling F, Scheurer M, Koschorreck J, Hoffmann G, Ternes TA, Nödler K: Levels and temporal trends of trifluoroacetate (TFA) in archived plants: evidence for increasing emissions of gaseous TFA precursors over the last decades. *Environ Sci Technol Lett* 2022, 9:400–405. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00164>.

Freeling, F., & Björnsdotter, M. K. Assessing the environmental occurrence of the anthropogenic contaminant trifluoroacetic acid (TFA). *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 2023, 41, 100807.

Holland R, Khan MAH, Driscoll I, Chhantyal-Pun R, Derwent RG, Taatjes CA, Orr-Ewing AJ, Percival CJ, Shallcross DE: Investigation of the production of trifluoroacetic acid from two halocarbons, HFC-134a and HFO-1234yf and its fates using a global three-dimensional chemical transport model. *ACS Earth Space Chem* 2021, 5:849–857. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00355>.

Hurley MD, Wallington TJ, Javadi MS, Nielsen OJ: Atmospheric chemistry of CF₃CFCH₂: products and mechanisms of Cl atom and OH radical initiated oxidation. *Chem Phys Lett* 2008, 450:263–267. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.11.051>.

- Inoue M, Sumii Y, Shibata N:** Contribution of organofluorine compounds to pharmaceuticals. ACS Omega 2020, 5:10633–10640. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00830>.
- Joerss, Hanna,** et al. "Pesticides can be a substantial source of trifluoroacetate (TFA) to water resources." Environment International 193, 2024: 109061. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109061>
- Joudan S, de Silva AO, Young CJ:** Insufficient evidence for the existence of natural trifluoroacetic acid. Environ Sci: Process Impacts 2021, 23:1641–1649. <https://doi.org/10.1039/d1em00306b>.
- Klein A:** Halogenierte essigsäuren in der Umwelt. Zugl.: bayreuth, univ., diss. In Als Ms. gedr. Aachen: Shaker; 1997.
- Kooperation Land- und Wasserwirtschaft** im Einzugsgebiet der Stevertalsperre, Kooperationsbericht Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet der Stevertalsperre. Bericht 2021 2022. <https://www.landwirtschaftskammer.de/coesfeld/stevertkooperation/pdf/bericht2021.pdf>.
- Lesmeister, L., Lange, F. T., Breuer, J., Biegel-Engler, A., Giese, E., & Scheurer, M. (2021).** Extending the knowledge about PFAS bioaccumulation factors for agricultural plants—A review. Science of The Total Environment, 766, 142640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142640>
- López SE, Salazar J:** Trifluoroacetic acid: uses and recent applications in organic synthesis. J Fluor Chem 2013, 156: 73–100. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2013.09.004>.
- Nödler K, Freeling F, Sandholzer A, Schaffer M, Schmid R, Scheurer M:** Untersuchungen zum „Vorkommen und Bildungspotential von Trifluoracetat (TFA) in niedersächsischen Oberflächengewässern. 2019. https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/141156/Untersuchungen_zum_Vorkommen_und_Bildungspotential_von_Trifluoracetat_TFA_in_nieder-saechsischen_Oberflaechengewaessern_.pdf.
- Nödler K, Freeling F, Scheurer M, Schaffer M, Schmid R:** Vorkommen kleiner hochpolarer kontaminanten in oberflächengewässern niedersachsens. Wasser Abfall 2020, 22: 14–19. <https://doi.org/10.1007/s35152-019-0172-2>.
- Ogawa Y, Tokunaga E, Kobayashi O, Hirai K, Shibata N:** Current Contributions of Organofluorine Compounds to the Agro-chemical Industry. iScience 2020, 23, 101467. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101467>.
- Pickard HM, Criscitiello AS, Persaud D, Spencer C, Muir DCG, Lehnher I, Sharp MJ, de Silva AO, Young CJ:** Ice core record of persistent short-chain fluorinated alkyl acids: evidence of the impact from global environmental regulations. Geophys Res Lett 2020, 47:65. <https://doi.org/10.1029/2020GL087535>.
- Scheurer M, Nödler K, Freeling F, Janda J, Happel O, Riegel M, Müller U, Storck FR, Fleig M, Lange FT, Brunsch A, Brauch H-J:** Small, mobile, persistent: trifluoroacetate in the water cycle- overlooked sources, pathways, and consequences for drinking water supply. Water Res 2017, 126:460–471. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.045>.
- Solomon KR, Velders GJM, Wilson SR, Madronich S, Longstreth J, Aucamp PJ, Bornman JF:** Sources, fates, toxicity, and risks of trifluoroacetic acid and its salts: relevance to substances regulated under the Montreal and Kyoto Protocols. J Toxicol Environ Health, Part B 2016, 19:289–304. <https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1175981>.
- Tisler S, Zindler F, Freeling F, Nödler K, Toelgyesi L, Braunbeck T, Zwiener C:** Transformation products of fluoxetine formed by photodegradation in water and biodegradation in zebrafish embryos (Danio rerio). Environ Sci Technol 2019, 53:7400–7409. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00789>.
- Wallington TJ, Hurley MD, Fracheboud JM, Orlando JJ, Tyndall GS, Sehested J, Møgelberg TE, Nielsen OJ:** Role of excited CF 3 CFHO radicals in the atmospheric chemistry of HFC-134a. J Phys Chem 1996, 100:18116–18122. <https://doi.org/10.1021/jp9624764>.
- Xie G, Cui J, Zhai Z, Zhang J:** Distribution characteristics of trifluoroacetic acid in the environments surrounding fluorochemical production plants in Jinan, China. Environ Sci Pollut Res Int 2020, 27:983–991. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06689-4>.
- Zhang, L., Sun, H., Wang, Q., Chen, H., Yao, Y., Zhao, Z., & Alder, A. C. (2019).** Uptake mechanisms of perfluoroalkyl acids with different carbon chain lengths (C2-C8) by wheat (Triticum acstivnm L.). Science of the Total Environment, 654, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.443>

Zhou J, Saeidi N, Wick LY, Xie Y, Kopinke F-D, Georgi A: Efficient removal of trifluoroacetic acid from water using surface-modified activated carbon and electro-assisted desorption. J Hazard Mater 2022, 436:129051.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129051>.

Annexes :

Annexe 1 : Données spatiales utilisées dans notre analyse

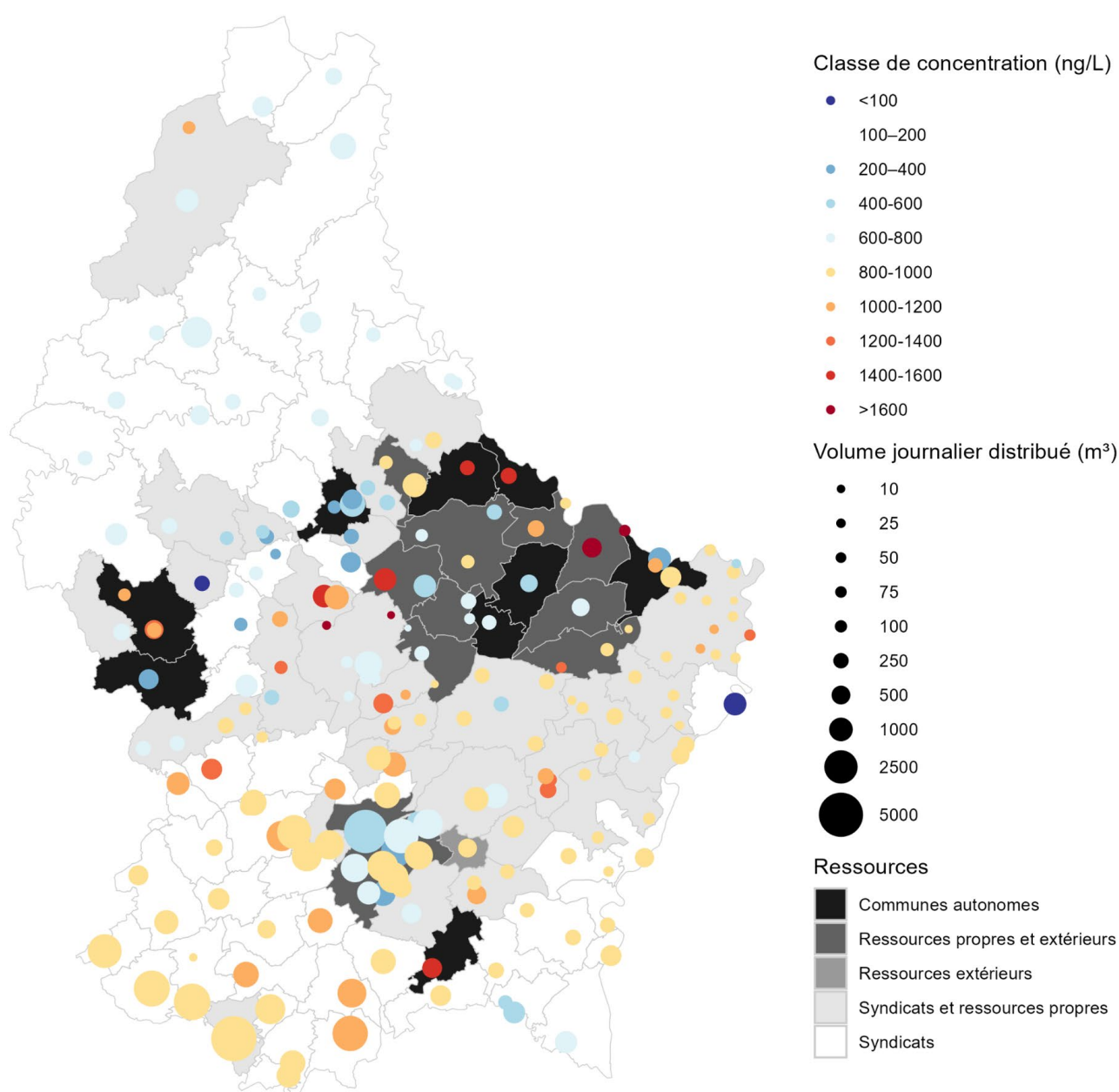
column_name	unit	description	Short name
basin_id	-	Internal reference number	xtrct_basi
x	LUREF - EPSG:2169	X coordinate of outlet	xtrct_x
y	LUREF - EPSG:2169	Y coordinate of outlet	xtrct_y
area_global	hectares	Global cover of catchment area	xtrct_area
area_national	hectares	National cover of catchment area	xtrct_ar_1
national_cover	%	Share of national/global cover of catchment area	xtrct_nati
c_sealed	%	Share of global coverage of catchment area of sealed land cover	xtrct_c_se
c_aracoglass	%	Share of global coverage of catchment area of arable and grass land cover	xtrct_c_ar
c_forest	%	Share of global coverage of catchment area of forest land cover	xtrct_c_fo
c_bare_soil	%	Share of global coverage of catchment area of bare soil land cover	xtrct_c_ba
c_water	%	Share of global coverage of catchment area of water land cover	xtrct_c_wa
c_vine	%	Share of global coverage of catchment area of vine land cover	xtrct_c_vi
lc_18_buildings	%	Share of national coverage of catchment area of buildings land cover	xtrct_lc_1
lc_18_constructed	%	Share of national coverage of catchment area of constructed land cover	xtrct_lc_2
lc_18_bare_soil	%	Share of national coverage of catchment area of bare soil land cover	xtrct_lc_3
lc_18_water	%	Share of national coverage of catchment area of water land cover	xtrct_lc_4
lc_18_trees	%	Share of national coverage of catchment area of trees land cover	xtrct_lc_5
lc_18_bushes	%	Share of national coverage of catchment area of bushes land cover	xtrct_lc_6
lc_18_perm_herb_veg	%	Share of national coverage of catchment area of permanent herbaceous land cover	xtrct_lc_7

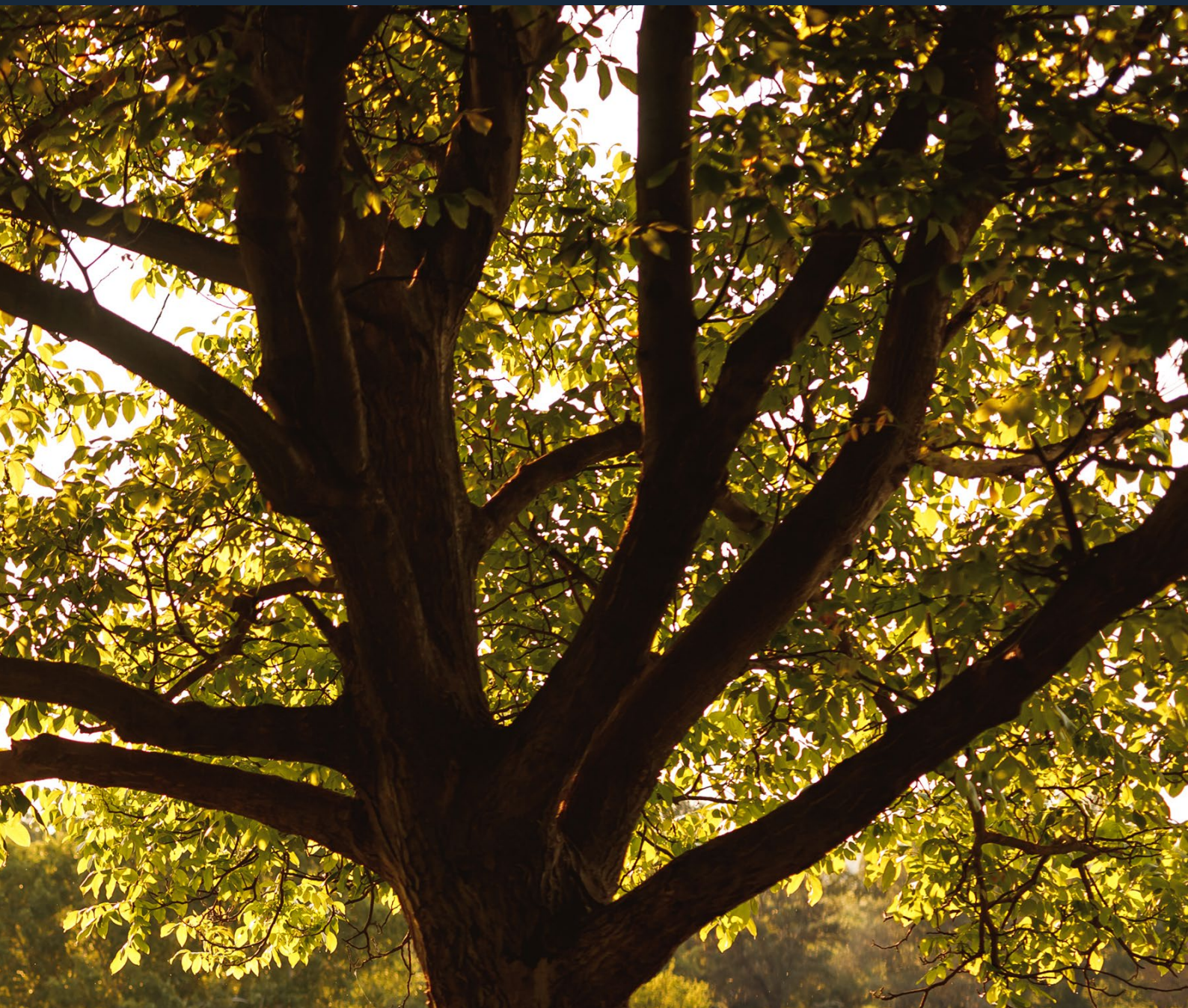
lc_18_seas_herb_veg	%	Share of national coverage of catchment area of seasonal herbacious land cover	xtrct_lc_8
lc_18_vine	%	Share of national coverage of catchment area of vine land cover	xtrct_lc_9
lu_18_settlement	%	Share of national coverage of catchment area of settlement land use	xtrct_lu_1
lu_18_agri	%	Share of national coverage of catchment area of agriculture land use	xtrct_lu_2
lu_18_forest	%	Share of national coverage of catchment area of forest land use	xtrct_lu_3
lu_18_natural_surf	%	Share of national coverage of catchment area of natural surfaces land use	xtrct_lu_4
lu_18_water	%	Share of national coverage of catchment area of water land use	xtrct_lu_5
lu_18_transport	%	Share of national coverage of catchment area of transport land use	xtrct_lu_6
f_wcereals	%	Share of national coverage of catchment area of winter cereals crops	xtrct_f_wc
f_scereals	%	Share of national coverage of catchment area of summer cereals crops	xtrct_f_sc
f_maize	%	Share of national coverage of catchment area of maize crops	xtrct_f_ma
f_seed_potato	%	Share of national coverage of catchment area of seed potatoes crops	xtrct_f_se
f_table_potato	%	Share of national coverage of catchment area of table potatoes crops	xtrct_f_ta
f_oilseed	%	Share of national coverage of catchment area of oilseeds crops	xtrct_f_oi
f_grassland	%	Share of national coverage of catchment area of grasslands crops	xtrct_f_gr
f_legume	%	Share of national coverage of catchment area of legume crops	xtrct_f_le
pedo_oesling	%	Share of national coverage of catchment area of Oesling soils	xtrct_pedo
pedo_stony_loams	%	Share of national coverage of catchment area of stony loams soils	xtrct_pe_1
pedo_sandy	%	Share of national coverage of catchment area of sandy soils	xtrct_pe_2
pedo_loess	%	Share of national coverage of catchment area of loess soils	xtrct_pe_3
pedo_clay	%	Share of national coverage of catchment area of clay soils	xtrct_pe_4
pedo_colluvium	%	Share of national coverage of catchment area of colluvium soils	xtrct_pe_5
geo_sandstone	%	Share of national coverage of catchment area of sandstone geology	xtrct_geo_
geo_lias	%	Share of national coverage of catchment area of lias geology	xtrct_geo1

geo_keuper	%	Share of national coverage of catchment area of keuper geology	xtrct_ge_1
geo_oesling	%	Share of national coverage of catchment area of Oesling geology	xtrct_ge_2
geo_dogger	%	Share of national coverage of catchment area of dogger geology	xtrct_ge_3
b	%	Share of national coverage of catchment area of Buntsandstein aquifer	xtrct_b
ml	%	Share of national coverage of catchment area of Mittlerer Lias aquifer	xtrct_ml
ol	%	Share of national coverage of catchment area of Oberer Lias aquifer	xtrct_ol
om	%	Share of national coverage of catchment area of Oberer Muschelkalk aquifer	xtrct_om
tr	%	Share of national coverage of catchment area of Trias aquifer	xtrct_tr
ul	%	Share of national coverage of catchment area of Unterer Lias aquifer	xtrct_ul
dem_min	meter	Minimum height value a.s.l in catchment	xtrct_dem_
dem_max	meter	Maximum height value a.s.l in catchment	xtrct_dem1
slope_min	degrees	Minimum slope value in catchment	xtrct_slop
slope_mean	degrees	Mean slope value in catchment	xtrct_sl_1
slope_max	degrees	Maximum slope value in catchment	xtrct_sl_2
mqaug	m3/s	Mean discharge	xtrct_eros
nqaug	m3/s	Mean dry-weather discharge	xtrct_pe
rel_mq_nq	%	Share of mean/dry-weather discharge	xtrct_pe_g
mqnat	m3/s	Mean natural discharge	
nqnat	m3/s	Mean dry-weather natural discharge	
rel_nat_mq_nq	%	Share of mean/dry-weather discharge	
struktur	-	Classification of hydromorphological status of river stretch which intersects outlet point	
pe	-	Sum of WWTP people-equivalent in catchment area	
pe_glob_ha	pe/he	Sum of WWTP people-equivalent in catchment area divided by global catchment area	
x_4326	WGS84 - EPSG:4326	X coordinate in lat/long projection	
y_4326	WGS84 - EPSG:4326	Y coordinate in lat/long projection	
geo	degrees	Concatenated string of column x_4326 and y_4326	

Annexe IV - Carte des distributions des concentrations en TFA dans les réseaux d'approvisionnement public en eau potable

Concentration moyenne du TFA aux points AEP
Toutes les données disponibles au 01/02/2026





LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et de la Biodiversité



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de la Santé
et de la Sécurité sociale



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Agriculture,
de l'Alimentation et de la Viticulture