

**SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT**  
FRANÇAIS / ENGLISH

**TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT ET  
D'ELIMINATION DES PFAS**

***PFAS TREATMENT AND DISPOSAL TECHNOLOGIES***

**Novembre 2025**

**C. BARNIER, C. DECHELETTE, E. MARTIN, L. BOTELLA,  
W. ELAGLIA, I. DELSARTE – WSP France**



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Technologies de traitement et d'élimination des PFAS, 2025, 279p, n°24-0257/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## **RESUME**

Les PFAS, du fait de leurs propriétés uniques sont utilisés depuis les années 70 dans de nombreux secteurs d'activités et produits manufacturés. En raison des nombreuses sources primaires et secondaires, les PFAS se retrouvent dans toutes les matrices environnementales. Les technologies de traitement des contaminants traditionnels peuvent s'avérer inefficaces face aux PFAS en raison de leur stabilité et résistance aux processus destructifs et des faibles concentrations à atteindre. La recherche sur les technologies de traitement des PFAS évolue, mais les données disponibles restent limitées et se concentrent sur quelques composés spécifiques. Actuellement, il est difficile d'évaluer l'efficacité des traitements pour l'ensemble des composés et matrices.

Cette étude propose de faire un état des lieux de l'efficacité des techniques de traitements. Cet état de l'art permettra d'estimer l'efficacité des traitements en fonction des composés présents et de la matrice, afin de définir des stratégies de traitement adaptées.

Pour atteindre ce but, l'étude se divise en trois parties. La première partie consiste à identifier les sources des PFAS et les matrices impactées afin de déterminer où les traitements doivent être appliqués, en tenant compte de la diversité des composés fluorés. La deuxième partie se focalise sur la compréhension théorique de l'origine de la stabilité des PFAS (moléculaire, interactions avec l'environnement, processus de transformation naturelle et anthropique). Le dernier axe se concentre sur un inventaire et une analyse complète des différentes technologies actuellement commercialisées et en cours de développement dans le monde entier pour le traitement des PFAS dans différentes matrices. Pour évaluer l'efficacité des technologies sur les composés non étudiés, une modélisation a été réalisée à partir de leurs propriétés physico-chimiques.

## **MOTS CLES**

PFAS ; sources ; stabilité moléculaire ; persistance ; interactions environnementales ; transformation ; traitement ; élimination ; séparation ; concentration ; destruction ; immobilisation ; stabilisation

---

## **SUMMARY**

Due to their unique properties, PFAS have been used since the 1970s in a wide range of industries and manufactured products. Due to their many primary and secondary sources, PFAS are found in all environmental matrices. Conventional contaminant treatment technologies often prove ineffective against PFAS due to their stability and resistance to destructive processes and the low concentrations to be achieved. Research into PFAS treatment technologies is evolving, but available data remains limited and focused on a few specific compounds. At present, it is difficult to assess the effectiveness of treatments for all compounds and matrices.

This study proposes to take stock of the effectiveness of treatment techniques. This will enable us to estimate the effectiveness of treatments as a function of the compounds present and the matrix, to define appropriate treatment strategies.

To achieve this goal, the study is divided into three parts. The first part involves identifying the sources of PFAS and the matrices impacted, to determine where treatments should be applied, considering the diversity of fluorinated compounds. The second part focuses on the theoretical and didactic understanding of the origin of PFAS stability (molecular interactions with the environment, natural and anthropogenic transformation processes). The final section will focus on a comprehensive inventory and analysis of the various technologies currently commercially available and under development worldwide for processing PFAS in different matrices. To assess the effectiveness of the technologies on the compounds that were not studied, a modelling approach was carried out based on their physicochemical properties.

## **KEY WORDS**

PFAS, Sources; Molecular stability; Persistence; Environmental interactions; Transformation; Treatment; Removal; Separation; Concentration; Destruction; Immobilization; Stabilization

## Contexte

Les PFAS constituent une vaste famille de plus de 12 000 composés organiques synthétisés par l'Homme. Leurs structures moléculaires et propriétés physico-chimiques varient considérablement. Cependant, ces composés ont comme caractéristique commune d'avoir au moins un atome de carbone totalement substitué par des atomes de fluor c'est à dire un groupe méthyle perfluoré (-CF<sub>3</sub>) ou un groupe méthylène perfluoré (-CF<sub>2</sub>-) (OCDE 2021). La liaison carbone-fluor leur confère une remarquable stabilité chimique et thermique, ce qui a conduit à leur utilisation généralisée dans les diverses applications industrielles (médical, l'automobile, l'électronique etc.), les produits de consommation (emballage alimentaire, vêtements, etc.) et les applications de lutte contre les incendies.

A partir des années 2000, des avancées scientifiques ont mis en évidence des impacts potentiels sur la santé et l'environnement, menant à une préoccupation publique et une considération réglementaire. Les effets observés concernent l'ensemble du cycle de vie des PFAS, depuis leurs émissions par les producteurs ou utilisateurs jusqu'à leur élimination sous forme de déchets ou leur dispersion dans les différentes matrices environnementales. En raison de leur stabilité, les PFAS sont très résistants à la dégradation et persistent dans l'environnement. La diversité des composés entraîne des comportements variés et complexes dans les matrices, dépendant de nombreux facteurs tels que le type de PFAS, la présence de co-contaminants et les propriétés du milieu. De plus, la présence de précurseurs et leurs transformations potentielles en PFAS terminaux ajoutent un niveau supplémentaire dans l'évaluation de leur comportement et de leur devenir.

Les PFAS sont ainsi omniprésents dans l'environnement mais les niveaux de connaissance en France restent très variables selon les matrices étudiées. Les données disponibles concernent principalement les milieux liquides (eaux de surface et eaux souterraines), en lien avec la réglementation récente, notamment l'arrêté de juin 2023 qui cible 20 substances dans le cadre de la DCE. Des actions de surveillance sont menées sur les incinérateurs et les rejets d'installations classées (ICPE), mais elles se concentrent sur un nombre restreint de composés. En revanche, les boues de STEP font l'objet de diagnostics encore incomplets et les données sur les sols et les milieux gazeux restent très limitées. Cette hétérogénéité freine la compréhension globale du cycle environnemental des PFAS et complique la mise en œuvre de stratégies de gestion cohérentes.

Cette connaissance est partielle en raison de plusieurs facteurs. Le cadre réglementaire est encore peu développé, avec seulement quelques valeurs de références existantes notamment pour l'eau potable, limitant les obligations de surveillance dans d'autres matrices. Les références toxicologiques sont encore insuffisantes et limitées à quelques composés, rendant difficile l'évaluation des risques sanitaires. Le développement en cours des méthodes de prélèvement (matrice gazeuse), les coûts analytiques élevés et les connaissances nécessaires pour interpréter les données freinent leur généralisation. Par exemple, l'utilisation du paramètre intégrateur AOF (Fluor organique Adsorbable) peut s'avérer complexe à interpréter, notamment lorsque les concentrations mesurées sont supérieures à la liste des 20 PFAS ou à l'ensemble des PFAS pouvant être analysés (environ 60).

Par conséquent, les propriétaires de sites restent réservés quant à réaliser des campagnes d'analyse, notamment sur les

## Context

*PFAS constitute a large family of more than 12,000 synthetic organic compounds produced by humans. Their molecular structures and physicochemical properties vary considerably. However, these compounds share the common characteristic of having at least one carbon atom fully substituted with fluorine atoms—that is, a perfluoromethyl group (CF<sub>3</sub>) or a perfluoromethylene group (CF<sub>2</sub>) (OECD 2021). The carbon–fluorine bond gives them remarkable chemical and thermal stability, which has led to their widespread use in various industrial applications (medical, automotive, electronics, etc.), consumer products (food packaging, textiles, etc.), and firefighting applications.*

*From the early 2000s onward, scientific advances highlighted potential impacts on health and the environment, triggering public concern and regulatory attention. Observed effects relate to all stages of the PFAS life cycle, from emissions by producers or users to their disposal as waste or their dispersion into different environmental matrices. Due to their stability, PFAS are highly resistant to degradation and persistent in the environment. The diversity of compounds leads to varied and complex behaviours in environmental media, depending on many factors such as the type of PFAS, the presence of co-contaminants, and the properties of the receiving environment. In addition, the presence of precursors and their possible transformation into terminal PFAS adds another layer of complexity when assessing PFAS behaviour and fate.*

*PFAS are thus ubiquitous in the environment, but the level of knowledge in France remains highly variable depending on the matrix studied. Available data relate mainly to liquid media (surface water and groundwater), in connection with recent regulations, notably the June 2023 decree targeting 20 substances under the Water Framework Directive (WFD). Monitoring actions are carried out on incinerators and releases from regulated facilities (ICPE), but they focus on a limited number of compounds. Conversely, wastewater treatment plant (WWTP) sludge has been subject to only partial characterisation, and data on soils and gaseous media remain very limited. This heterogeneity hinders an overall understanding of the environmental cycle of PFAS and complicates the implementation of coherent management strategies.*

*This limited knowledge results from several factors. The regulatory framework is still underdeveloped, with only a few existing reference values—mainly for drinking water—thus limiting monitoring obligations in other matrices. Toxicological reference values are still insufficient and restricted to a few compounds, making health risk assessment difficult. Ongoing development of sampling methods (e.g., for gaseous matrices), high analytical costs, and the expertise required to interpret data hinder wider implementation. For example, the use of the integrative parameter AOF (Adsorbable Organic Fluorine) can be difficult to interpret, particularly when measured concentrations exceed the list of 20 PFAS or the full set of analyzable PFAS (roughly 60).*

*As a result, site owners remain reluctant to carry out sampling campaigns—particularly on soils and groundwater—due to concerns about obtaining data that are difficult to interpret from a regulatory standpoint.*

sols et les eaux souterraines, par crainte d'obtenir des données difficiles à interpréter sur le plan réglementaire.

## Objectif de l'étude

L'objectif final de l'étude est d'identifier les solutions de traitement adaptées à chaque type d'émission. Pour y parvenir, la stratégie a consisté à analyser le cycle de vie des PFAS, depuis leur comportement dans l'environnement et dans les dispositifs de traitement existants, jusqu'à leur comportement et leur éventuelle destruction dans les technologies spécifiquement dédiées à ce type de contaminants. Cette approche tient compte de la diversité des composés à travers :

- L'analyse de leurs propriétés physico-chimiques et thermodynamiques pour expliquer leur persistance et leur comportement dans les différentes matrices ;
- L'étude de leur interaction avec les milieux en fonction des paramètres tel que le pH, la teneur en eau, la matière organique etc. ;
- Un état des lieux des technologies disponibles et de leur efficacité respective ;
- L'utilisation des propriétés des PFAS pour modéliser par extrapolation les performances de traitement, en réponse à des données limitées et souvent focalisées sur un nombre restreint de composés.

En fournissant des niveaux d'efficacité atteignables, cette étude peut servir de support de décision pour aider les autorités à prioriser les flux à traiter et à définir des objectifs réglementaires.

## Organisation de l'étude

L'étude s'organise selon 3 axes. Le premier axe permet d'identifier les sources, les lieux et les matrices où un traitement peut être appliqué. Cette identification, indispensable au bon déroulement de l'étude, tient compte des différents composés et familles de composés retrouvés.

Le second axe étudie le transport et devenir des PFAS au sein des différents processus de transformation naturels et anthropiques. Cette partie inclut à la fois la compréhension théorique de la stabilité des PFAS ainsi que l'étude globale des différentes interactions existantes entre ces substances et les caractéristiques des matrices (eau, air et sol) en lien avec leurs propriétés physico-chimiques. Ce second axe permet de comprendre comment les composés se comportent pour les traiter au mieux.

Le troisième axe recense et analyse les différentes technologies de traitement en fonction des milieux et des matrices. Le but de cette partie étant de fournir une vision la plus complète possible des traitements disponibles à ce jour. Les technologies évoluant rapidement, les informations présentées sont susceptibles d'évoluer.

## Principaux résultats

Dans cette étude, 36 composés PFAS ont été sélectionnés pour représenter la diversité et l'omniprésence de cette famille dans l'environnement. Le choix s'est fondé sur leur occurrence dans les sources, la variété de leurs propriétés physico-chimiques, leur prévalence dans les matrices, ainsi que la disponibilité des données analytiques. Compte tenu des comportements très variables des PFAS liés à la diversité de leurs structures, au manque de connaissances sur certains composés et aux incertitudes analytiques, il apparaît que leur classification ne peut se limiter à la longueur de la chaîne fluorée.

## Objective of the study

*The ultimate objective of the study is to identify treatment solutions tailored to each type of emission. To achieve this, the strategy consisted in analysing the life cycle of PFAS—from their behaviour in the environment and within existing treatment systems, to their behaviour and potential destruction in technologies specifically designed for this class of contaminants. This approach considers the diversity of PFAS compounds through:*

- *The analysis of their physicochemical and thermodynamic properties to explain their persistence and their behaviour in different matrices;*
- *The study of their interactions with environmental media as a function of parameters such as pH, moisture content, organic matter, etc.;*
- *A review of the available technologies and their respective efficiency;*
- *The use of PFAS properties to model treatment performance by extrapolation, in response to limited data that often focus on a narrow subset of compounds.*

*By providing achievable levels of treatment efficiency, this study can serve as a decision support tool to help authorities prioritise the streams to be treated and to define regulatory objectives.*

## Organisation of the study

*The study is structured around three main components. The first component aims to identify the sources, locations, and matrices in which treatment can be applied. This identification step, essential for the proper progression of the study, considers the different compounds and families of compounds encountered.*

*The second component examines the transport and fate of PFAS across various natural and anthropogenic transformation processes. This part includes both the theoretical understanding of PFAS stability and a broader analysis of the different interactions between these substances and the characteristics of environmental matrices (water, air, and soil), in relation to their physicochemical properties. This component provides the basis for understanding how the compounds behave to better inform treatment strategies.*

*The third component inventories and analyses the different treatment technologies according to the media and matrices involved. The purpose of this section is to provide the most comprehensive overview possible of the treatments available to date. As technologies evolve rapidly, the information presented is likely to change.*

## Main results

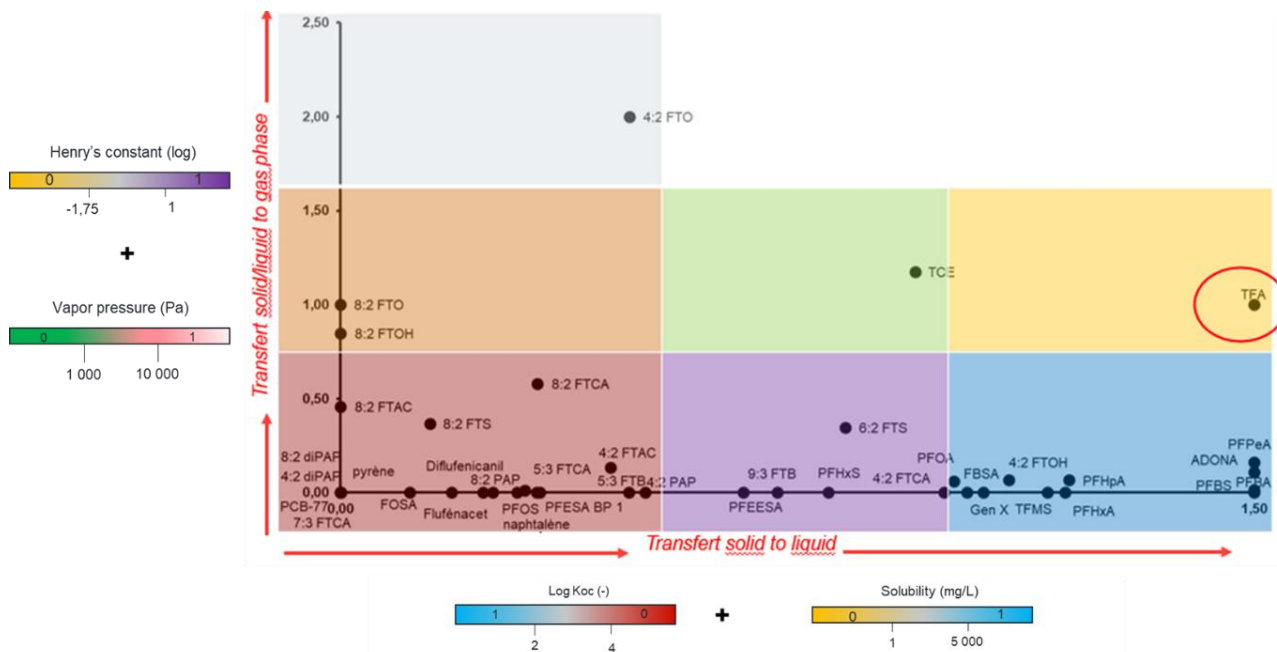
*In this study, 36 PFAS compounds were selected to represent the diversity and ubiquity of this family in the environment. The selection was based on their occurrence in emission sources, the variety of their physicochemical properties, their prevalence in environmental matrices, and the availability of analytical data. Given the highly variable behaviour of PFAS—linked to the diversity of their structures, the limited knowledge available for certain compounds, and analytical uncertainties—it appears that their classification cannot be restricted to the length of the fluorinated chain alone.*

Une représentation graphique basée sur ces propriétés permet de visualiser leur comportement théorique environnemental (mobilité, répartition entre phases) et de les comparer à des composés de référence bien connus tel que le naphtalène ou le trichloroéthylène (TCE) (Figure 1). Cette approche met en évidence l'intérêt de classer les PFAS selon d'autres caractéristiques que la longueur de leur chaîne fluorée afin de mieux anticiper leur devenir dans l'environnement et d'orienter les choix technologiques.

Il est également important de souligner que le comportement et le devenir des PFAS sont influencés par les caractéristiques du milieu dans lequel ils se trouvent. Un tableau synthétique des paramètres environnementaux influents est également fourni dans l'étude, afin d'appuyer l'analyse et de mieux anticiper le devenir des PFAS.

A graphical representation based on these properties makes it possible to visualize their theoretical environmental behaviour (mobility, phase distribution) and to compare them with well known reference compounds such as naphthalene or trichloroethylene (TCE) (Figure 1). This approach highlights the relevance of classifying PFAS according to characteristics other than fluorinated chain length to better anticipate their environmental fate and guide technological decision making.

It is also important to highlight that the behaviour and fate of PFAS are influenced by the characteristics of the medium in which they are found. A summary table of the relevant environmental parameters is also provided in the study to support the analysis and to better predict the fate of PFAS.



**Figure 1 : Représentation des comportements des composés PFAS sélectionnés et comparaison à des composés types dont le comportement est connu : TCE, Naphtalène, Pyrène, PCB-77 (RECORD 2025)**  
**Figure 1: Representation of the behaviours of the selected PFAS compounds and comparison with reference compounds whose behaviour is well known: TCE, Naphthalene, Pyrene, PCB 77 (RECORD 2025)**

Le dernier axe de l'étude présente une revue actualisée des technologies consolidées, émergentes et pouvant être appliquées sur les différentes matrices issues des flux canalisés et présentes dans les différents milieux récepteurs environnementaux. Le tableau ci-dessous montre les techniques abordées dans cette étude. Les principales informations de chacune des technologies, parfois complexes ont été synthétisées à la fin du rapport de l'étude sous la forme d'un tableau.

The final component of the study presents an up to date review of consolidated and emerging technologies that can be applied to the different matrices originating from channeled flows as well as those present in various environmental receiving media. The table below shows the techniques addressed in this study. The key information for each technology—sometimes complex—has been summarized at the end of the study report in the form of a table.

**Tableau 1 : Techniques de traitement considérées dans l'étude séparées selon leur type d'application (séparation/concentration, destruction et immobilisation) et identifiées selon leur niveau de maturité et champ d'application (RECORD, 2025)**

**Table 1: Treatment techniques considered in the study, organized according to their type of application (separation/concentration, destruction, and immobilization) and identified based on their maturity level and field of application (RECORD, 2025)**

Technology	TRL level	Matrices		
		Liquid	Solid	Gaseous
<b>Separation/ Concentration</b>				
Adsorption on activated carbon (CAG and PAC)	TRL 9	x		X
Adsorption on ion-exchange resins (IX et R-IX)	TRL 9	x		
Adsorption on other sorbents (zeolites, biochar, mineral materials)	TRL 3 à TRL 9	x		
Membrane filtration	TRL 9	x		
Foam fractionation	TRL 9	x		
Coagulation/Flocculation	TRL 3-7	x		
<i>ex situ</i> soil washing	TRL 9		x	
<i>in situ</i> soil washing	TRL 6-7		x	
Thermal desorption	TRL 7-8		x	
Phytoremediation	TRL 3-5		x	
<b>Destruction</b>				
Incineration (thermal oxidation)	TRL 9	x	x	x
Cement kiln co-processing	TRL 9 <sup>1</sup>	x	x	
Hydrothermal gasification	TRL 6-7			
Pyrolysis / thermolysis / gasification	TRL 4-7		X	
Smoldering	TRL 4-7	X <sup>2</sup>	X	
Supercritical water oxidation (SCWO)	TRL 9	X	X <sup>3</sup>	
Hydrothermal alkaline treatment (HALT)	TRL 7-8	x	X	
Electrochemical oxidation (EO)	TRL 4-9	x		
In-plasma destruction	TRL 4 -7	x		
Sonolysis	TRL 3-4	x		
Other reduction / oxidation techniques	TRL 3-4	x	X <sup>3</sup>	
Ball milling	TRL 5-7		x	
Bioremediation	TRL 3-5	x	x	
<b>Immobilisation/confinement</b>				
Stabilisation – Solidification	TRL9		x	
Permeable reactive barrier (PRB)	TRL9	x		
Containment	TRL9	x	x	

□ Consolidated technology (TRL 9) : industrial-scale, proven

□ Emerging technology (TRL 7 à 9) : tested at laboratory or pilot scale, with limited large-scale applications and in development

□ Experimental technology (TRL 1 à 6) : at research, laboratory or pilot level

Xx	Consolidated technology
Xx	Emerging technology
Xx	Experimental technology

<sup>1</sup> Some technologies are classified as TRL9 because they are fully operational in their general field of application, but they still require specific validation to confirm their effectiveness with respect to PFAS.

<sup>2</sup>NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids), provided they are combined with a porous matrix

<sup>3</sup>Solid matrix mixed with a liquid matrix

Cette étude met en évidence une plus grande diversité technologique pour le traitement des matrices liquides que pour les matrices solides et gazeuses. Les techniques les plus matures sont également les plus répandues sur le marché pour le traitement des autres contaminants, ce qui ne constitue pas une surprise majeure.

Parmi les techniques abordées, plusieurs solutions permettent de séparer et de concentrer les PFAS présents dans les matrices liquides.

La méthode de séparation par charbon actif (CA) est particulièrement efficace pour les PFAS à chaîne longue. Son utilisation peut permettre de respecter les limites réglementaires françaises actuelles (100 ng/l pour la somme des 20 PFAS dans les eaux potables), à condition d'utiliser un volume suffisant de CA. Cependant, cette technique montre ses limites face à des concentrations élevées de PFAS à chaîne courte ou dans le cas d'effluents contenant des PFAS ultra-courts, pour lesquels l'efficacité du CA est réduite. Bien qu'il existe de nombreux types de CA, une vue d'ensemble de leur efficacité serait utile.

Dans ce contexte, les résines échangeuses d'ions constituent une alternative intéressante, malgré un coût d'achat plus élevé à poids équivalent, elles offrent des capacités de charge supérieures et une efficacité démontrée pour l'adsorption des PFAS à chaîne courte et ultracourte. Les résines à usage unique sont pour le moment plus performantes que les résines régénérables. Cela souligne la nécessité de poursuivre les efforts de développement pour améliorer l'efficacité des solutions régénérables.

Parmi, les autres méthodes de séparation consolidées, les techniques membranaires montrent que l'osmose inverse (OI) se révèle plus efficace que la nanofiltration (NF). Elle présente l'intérêt de pouvoir traiter l'ensemble des composés, y compris les PFAS à chaîne ultracourte.

*This study highlights a greater technological diversity for the treatment of liquid matrices than for solid and gaseous matrices. The most mature techniques are also the most widely used on the market for the treatment of other contaminants, which is not a major surprise.*

*Among the techniques examined, several solutions enable the separation and concentration of PFAS present in liquid matrices. Activated carbon (AC) separation is particularly effective for long-chain PFAS. Its use can allow compliance with current French regulatory limits (100 ng/L for the sum of 20 PFAS in drinking water), provided that a sufficient volume of AC is used. However, this technique shows limitations when dealing with high concentrations of short-chain PFAS or effluents containing ultrashort-chain PFAS, for which AC efficiency is reduced. Although numerous types of AC exist, an overall assessment of their relative performance would be useful.*

*In this context, ion-exchange resins represent an attractive alternative. Despite a higher purchase cost on a weight basis, they offer greater loading capacities and demonstrated effectiveness for the adsorption of short- and ultrashort-chain PFAS. Single-use resins currently outperform regenerable resins, highlighting the need for continued development to improve the performance of regenerable solutions.*

*Among other consolidated separation methods, membrane technologies show that reverse osmosis (RO) is more effective than nanofiltration (NF). RO has the advantage of being able to treat the full range of compounds, including ultrashort-chain PFAS.*

Enfin, le fractionnement par mousse est une technique de plus en plus utilisée comme méthode de séparation/concentration. Plusieurs entreprises la commercialisent avec des spécificités propres. Cette méthode présente une efficacité éprouvée pour les effluents avec des concentrations élevées en PFAS à chaîne longue (>C6). Plusieurs pistes de recherche et de développement (tensioactifs, séparation sous vide) sont en cours pour améliorer la séparation des composés à chaînes courtes.

Concernant les méthodes de séparation appliquées aux matrices solides, le lavage de sol *ex situ* est actuellement la seule technique mature. Son efficacité dépend fortement de la granulométrie des sols et de leur teneur en matière organique, et reste principalement limitée aux PFAS à chaîne courte (<C8). Cette méthode ne permet donc pas à elle seule, de gérer l'ensemble des sols contaminés. Par ailleurs, dans les pays disposant d'unités de lavage, l'évolution réglementaire vers des seuils de plus en plus stricts rend indispensable le développement d'autres techniques comme les procédés de désorption notamment pour les fractions fines du sol. Ces efforts seront essentiels pour fournir des traitements à la fois conformes aux exigences réglementaires et viables économiquement.

Pour le moment, la désorption thermique, présente des résultats prometteurs, mais les retours d'expériences demeurent encore insuffisants. En particulier, le manque de données sur les gaz générés ne permet pas d'évaluer la qualité de l'effluent gazeux à traiter, ni de réaliser un bilan de masse fiable. Cette méthode nécessite donc des études de flux plus précises.

Au niveau des technologies plus expérimentales, la phytoextraction pourrait être une solution de traitement compétitive, efficace et durable pour le traitement des sites modérément à fortement impactés. Il existe cependant encore de nombreuses lacunes sur les applications de cette méthode pour l'élimination des PFAS, bien que des possibilités de mise en œuvre aient été identifiées sur les matrices liquides et solides.

Parmi les méthodes de destruction disponibles, l'incinération est actuellement la seule technologie disponible et acceptée en France. Toutefois même si les données disponibles indiquent des taux d'abattement élevés, il convient de les interpréter avec prudence car elles ne concernent que les composés analysés. Comme pour la désorption thermique, l'absence de bilan de masse complet ne permet pas de conclure sur l'élimination totale des PFAS.

Concernant les techniques alternatives de destruction des PFAS, une dynamique croissante de déploiement commercial est observée, dont certaines arrivent en France. Parmi les technologies prometteuses, l'oxydation supercritiques (SCWO), le traitement hydrothermal alcalin (HALT) et l'électrooxydation peuvent être mentionnées. Ces méthodes ne permettent pour l'instant de traiter que de faibles débits et sont principalement adaptées aux matrices liquides. Le SCWO et HALT peuvent également traiter des solides, mais uniquement sous forme de suspension, avec une concentration en matière sèche inférieure à 20%. À plus long terme, ces technologies, pourraient venir en complément de l'incinération, dans une filière dédiée à la gestion des déchets très concentrés tels que les résines échangeuses d'ions ou leurs solutions de lavage, les charbons actifs non régénérables, ainsi que les concentrats issus de l'osmose inverse.

Globalement, pour l'ensemble des méthodes de traitement par destruction, qu'elles soient matures ou émergentes, il est indispensable de consolider leurs résultats obtenus par des bilans de masses complets. Cette nécessité implique de disposer des données précises sur les flux de PFAS avant et

*Finally, foam fractionation is a technique increasingly used as a separation/concentration method. Several companies now commercialize it with their own specific configurations. This method has proven effective for effluents with high concentrations of long-chain PFAS (>C6). Several research and development avenues (e.g., surfactants, vacuum-assisted separation) are currently being explored to improve the separation of short-chain compounds.*

*Regarding separation methods applied to solid matrices, *ex situ* soil washing is currently the only mature technique. Its effectiveness depends strongly on soil grain size and organic matter content and remains primarily limited to short-chain PFAS (<C8). This method therefore cannot, on its own, address all contaminated soil. Moreover, in countries equipped with soil-washing facilities, the regulatory trend toward increasingly stringent thresholds makes it essential to develop additional techniques such as desorption processes, particularly for fine soil fractions. These efforts will be crucial to provide treatments that are both compliant with regulatory requirements and economically viable.*

*At present, thermal desorption shows promising results, but operational feedback remains insufficient. In particular, the lack of data on the gases generated prevents assessing the quality of the gaseous effluent requiring treatment, as well as establishing of a reliable mass balance. This method therefore requires more precise flux-based studies.*

*Among the more experimental technologies, phytoextraction could become a competitive, effective and sustainable treatment option for sites with moderate to high contamination levels. However, substantial knowledge gaps remain regarding the application of this method for PFAS removal, even though potential implementation pathways have been identified for both liquid and solid matrices.*

*Among the available destruction methods, incineration is currently the only technology available and accepted in France. However, even if the available data indicate high removal rates, these results must be interpreted with caution because they concern only the compounds that were analyzed. As with thermal desorption, the absence of a complete mass balance does not allow any conclusion to be drawn on the total elimination of PFAS.*

*Regarding alternative PFAS destruction techniques, a growing dynamic of commercial deployment is being observed, with some technologies now arriving in France. Among the promising technologies, supercritical water oxidation (SCWO), hydrothermal alkaline treatment (HALT), and electro-oxidation can be mentioned. For now, these methods can only treat low flow rates and are mainly suitable for liquid matrices. SCWO and HALT can also treat solids, but only in suspension form, with a dry matter content below 20%. In the longer term, these technologies could complement incineration within a dedicated sector for managing highly concentrated wastes such as ion-exchange resins or their wash solutions, non-regenerable activated carbon, and concentrates from reverse osmosis.*

*Overall, for all destruction-based treatment methods, whether mature or emerging, it is essential to consolidate results using complete mass balances. This requires detailed data based on PFAS fluxes before and after treatment across the different phases (liquid, solid, aqueous) and on any transformation or degradation products. To achieve this, the development of more sensitive, less expensive, and more operational analytical methods, particularly for gaseous matrices (OTM 45 and 50), is indispensable to monitor treatments, meet future regulatory thresholds, and facilitate the deployment of PFAS monitoring.*

après traitement dans les différentes phases (liquide, solide, aqueuse) et les éventuels produits de transformation et de dégradation. Pour cela, le développement de méthodes analytiques plus sensibles, moins coûteuses et plus opérationnelles, notamment pour les matrices gazeuses (OTM 45 et 50) est indispensable pour suivre les traitements, garantir les futurs seuils réglementaires et faciliter le déploiement de la surveillance des PFAS.

L'étude propose également une synthèse de l'efficacité des technologies de traitement des PFAS sélectionnés, présentée sous la forme d'un tableau récapitulatif. Pour les composés disposant de peu, voire d'aucune donnée, l'évaluation s'appuie sur leurs propriétés physico-chimiques et sur les caractéristiques des procédés, permettant ainsi d'estimer l'efficacité par extrapolation comme dans l'exemple ci-dessous.

The study also provides a summary of the effectiveness of the selected PFAS treatment technologies, presented in the form of a summary table. For compounds for which little or no data are available, the assessment is based on their physicochemical properties and on the characteristics of the processes, thus allowing the effectiveness to be estimated by extrapolation, as illustrated in the example below

**Tableau 2 : Évaluation de l'efficacité des technologies de traitement vis-à-vis des 36 composés PFAS sélectionnés (RECORD, 2025)**

**Table 2: Assessment of the effectiveness of treatment technologies for the 36 selected PFAS compounds (RECORD, 2025)**

Group	Sub-group	Compound	Type of treatment	Separation / Concentration				Destruction		
			Matrix	Liquid phase				Liquid/Solid		
				Adsorption on AC	Adsorption sur on Resin	Reverse Osmosis	Foam Fractionation	HALT	SCWO	
PFAAs	PFCAs	TFA	Anionic	P	P	P	S	P	P	
		TFMS	Anionic	S	S	P	S	P	S	
		PFBA	Anionic	P	P	P	P	P	P	
		PFPeA	Anionic	P	P	P	P	P	P	
		PFHxA	Anionic	P	P	P	P	P	P	
		PFHpA	Anionic	P	P	P	P	S	P	
	PFESAs	PFOA	Anionic	P	P	P	P	P	P	
		PFBS	Anionic	P	P	P	P	P	P	
		PFHxS	Anionic	P	P	P	P	S	P	
		PFOS	Anionic	P	P	P	P	P	P	
PFEEAs et PolyFEAs	PFEECAs et H-PFEECAs	Gen x	Anionic	P	S	P	S	S	P	
		ADONA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
	PFESAs	PFEEA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
PFESA BP1		Anionic	S	S	S	S	S	S		
FASAs	FTSs	FBSA	Anionic	P	P	S	S	P	S	
		FOA	Anionic	P	P	P	S	S	P	
	FTACs	6:2 FTS	Anionic	P	P	P	P	S	P	
		8:2 FTS	Anionic	P	P	P	P	S	S	
		4:2 FTCA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
		5:3 FTCA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
		7:3 FTCA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
		8:2 FTCA	Anionic	S	S	S	S	S	S	
	FTOAs	FTACs	4:2 FTAC	Neutral	S	S	S	S	S	S
			8:2 FTAC	Neutral	S	S	S	S	S	S
FTOs		4:2 FTO	Neutral	S	S	S	S	S	S	
		8:2 FTO	Neutral	S	S	S	S	S	S	
FTOHs		4:2 FTOH	Neutral	S	S	S	S	S	S	
		8:2 FTOH	Neutral	S	S	S	S	S	S	
FTBs		5:3 FTB	Zwitterionic	S	S	S	S	S	S	
		9:3 FTB	Zwitterionic	S	S	S	S	S	S	
PAPs	4:2 PAP	Anionic	S	S	S	S	S	S		
	8:2 PAP	Anionic	S	S	S	S	S	S		
diPAPs	4:2 diPAP	Anionic	S	S	S	S	S	S		
	8:2 diPAP	Anionic	S	S	S	S	S	S		
Pesticides	Diffufenican	-	?	?	?	S	S	S		
	Flufenacet	-	?	?	?	S	S	S		

?	Unknown / not assumed
P	Technology not suitable based on feedback
S	Technology assumed not suitable
P	Technology moderately suitable based on feedback
S	Technology assumed moderately suitable
P	Technology suitable based on feedback
S	Technology assumed suitable

« Assumed » : effectiveness estimated based on the physicochemical parameters of the compound

« Supposé » : efficacité estimée à partir des paramètres physico chimiques du composé

## Conclusion

Cette étude montre qu'il n'y a pas de solution évidente et que tout est question d'énergie et des matrices polluées à traiter. En effet, toutes les technologies de traitement des PFAS, quelles soient matures ou émergentes, ne sont pas adaptées ou efficaces dans les mêmes conditions d'application. Par exemple, les procédés d'adsorption, tels que le CA ou les résines échangeuses d'ions, sont techniquement efficaces et souvent économiquement avantageuses pour le traitement de grands volumes de liquides à faible concentration, comme l'eau potable. En revanche, ces technologies peuvent s'avérer moins adaptées économiquement pour un traitement continu de faibles débits avec une concentration élevée en PFAS, tels que les mousses concentrées issues du procédé (FF). À l'inverse, plusieurs technologies de destruction des PFAS comme l'oxydation électrochimique, le traitement HALT ou SCWO, sont potentiellement efficaces pour des faibles débits et concentrations élevées.

## Conclusion

This study shows that there is no obvious solution, and that everything ultimately depends on the required energy and on the characteristics of the contaminated matrices requiring treatment. Indeed, all PFAS treatment technologies, whether mature or emerging, are not equally suitable or effective under the same application conditions. For example, adsorption processes such as activated carbon (AC) or ion exchange resins are technically efficient and often economically advantageous for treating large volumes of low concentration liquids, such as drinking water. Conversely, these technologies may be less economically suitable for the continuous treatment of low flow rates with high PFAS concentrations, such as the concentrated foams produced by the film forming process (FF). In contrast, several PFAS destruction technologies, such as electrochemical oxidation, HALT, or SCWO, are potentially effective for low flow rates and high concentrations.

De plus, toutes les technologies ne présentent pas les mêmes capacités de traitement selon les types de composés PFAS. Par exemple, certaines ont des performances limitées pour séparer les PFAS à chaîne courte ou ultra-courte, comme les CA, alors que des procédés membranaires et résine, dans des conditions optimales, peuvent permettre une séparation plus efficace de ces composés.

Face aux limites spécifiques de chaque technologie de traitement, une approche intégrée s'impose : combiner plusieurs technologies au sein de chaînes de traitement pour maximiser l'efficacité globale et limiter les coûts énergétiques. Par exemple, les technologies de destruction, souvent coûteuses ou complexes à mettre en œuvre seules, doivent être associées à des solutions de concentrations en amont.

Plusieurs points de vigilances ont également été identifiés au cours de cette étude.

A ce jour, la majorité des données disponibles, concernent en particulier les composés de la famille des PFCAs et PFSA, notamment le PFOS et PFOA. Ce focus limite la capacité à évaluer pleinement l'efficacité des technologies sur l'ensemble des familles de PFAS, notamment les composés à chaîne ultra-courte ainsi que les précurseurs. Bien que certaines hypothèses puissent être faites à partir de leurs propriétés physico-chimiques et de leur structure moléculaire, ces suppositions restent à confirmer par des données expérimentales.

Il est également essentiel de souligner que, pour une même technique, le niveau de maturité peut varier considérablement d'un fournisseur à l'autre. Ces disparités influencent directement les performances, les délais de mise en applications et la fiabilité des résultats. Elles s'expliquent par les efforts continus de recherche et développement, visant à améliorer l'efficacité des procédés, optimiser les coûts et répondre aux défis spécifiques posés par les composés PFAS. Dans ce contexte, il est fortement recommandé de consulter plusieurs fournisseurs en amont d'un projet, afin de comparer les solutions disponibles, établir un bilan coût-avantage, et réaliser des essais de faisabilité et de traitabilité en laboratoire et/ou pilote.

Cette approche, renforce la nécessité d'intégrer systématiquement des études technico-économiques et de faisabilité dans les phases amont du projet. Ces études doivent prendre en compte les spécificités du site, les seuils de rejets et les paramètres de la matrice tels que : la nature du sol, la géochimie de l'eau, les débits, les concentrations, la durée du traitement (ponctuel/pérenne), la présence de co-contaminant.

Les PFAS sont omniprésents dans l'environnement, sous des formes extrêmement variées, avec des comportements physico-chimiques très hétérogènes. Même si leur production et leur importation venaient à cesser, les stocks déjà présents dans les sols, les eaux et les produits de consommation continueront à circuler dans les écosystèmes pendant des décennies, voir des siècles. Face à cette réalité, il est essentiel de mettre en place des barrières de traitement sur les différents flux, qu'ils soient déjà traités (en sortie de STEP, d'unités industrielles ou de centres de traitement de lixiviats) ou non encore captés. Cette stratégie doit s'appuyer de retours d'expérience plus nombreux en conditions réelles, de méthodes analytiques plus robustes et accessibles ainsi que de seuils réglementaires clairs permettant d'orienter les choix technologiques et les priorités d'action.

La mobilisation collective des acteurs concernés est essentielle pour enrichir les connaissances, partager les retours d'expérience et contribuer à l'objectif commun de réduire durablement la présence des PFAS dans l'environnement.

*Furthermore, not all technologies exhibit similar performance depending on the type of PFAS compounds. For instance, some processes show limited performance for separating short chain or ultra short chain PFAS, such as AC, whereas membrane processes and resins, under optimal conditions, can allow for more effective separation of these compounds. Given the specific limitations of each treatment technology, an integrated approach is required: combining multiple technologies within treatment trains to maximize overall performance and limit energy costs. For example, destruction technologies—often costly or complex to implement on their own—must be combined with upstream concentration solutions.*

*Several points of attention were also identified during this study. To date, most of the available data concern PFCA and PFSA compounds, particularly PFOS and PFOA. This focus limits the ability to fully evaluate the effectiveness of technologies across all PFAS families, including ultra short chain compounds and precursors. Although certain assumptions can be made based on their physicochemical properties and molecular structure, these hypotheses still need to be confirmed by experimental data.*

*It is also essential to underline that, for a given technology, the maturity level can vary significantly from one provider to another. These disparities directly influence performance, implementation timelines and result reliability. They stem from continuous research and development efforts aimed at improving process efficiency, optimizing costs, and addressing the specific challenges posed by PFAS compounds. In this context, it is strongly recommended to consult several providers at the early stages of a project to compare available solutions, establish a cost benefit balance, and conduct feasibility and treatability tests at laboratory and/or pilot scale.*

*This approach reinforces the need to systematically integrate techno economic and feasibility studies during the early stages of a project. These studies must consider site specific characteristics, discharge thresholds, and matrix parameters such as soil type, water geochemistry, flow rates, concentrations, treatment duration (temporary/permanent), and the presence of co contaminants.*

*PFAS are ubiquitous in the environment, in extremely diverse forms, with highly heterogeneous physicochemical behaviours. Even if their production and import were to cease, the stocks already present in soils, waters, and consumer products will continue to circulate through ecosystems for decades, if not centuries. Faced with this reality, it is essential to implement treatment barriers across different flows—whether already treated (e.g., wastewater treatment plants, industrial discharges, leachate treatment facilities) or not yet captured. This strategy must rely on more extensive real world experience, more robust and accessible analytical methods, and clear regulatory thresholds guiding technological choices and priority actions.*

*Collective mobilisation of all stakeholders is essential to expand knowledge, share practical feedback, and contribute to the shared objective of sustainably reducing PFAS presence in the environment.*