



Traitement des métabolites de pesticides et des PFAS dans les eaux à destination de la consommation humaine

PRÉAMBULE

Les enjeux environnementaux majeurs relatifs à la qualité de l'eau sont au cœur des préoccupations actuelles, confrontant les collectivités à de nouvelles contraintes réglementaires et à l'évolution des connaissances. Une enquête flash menée par AMORCE, en 2023, sur la gestion des captages révèle une contamination importante des masses d'eaux par les pesticides et les PFAS sur l'ensemble territoire, amplifiant les défis auxquels sont confrontées les autorités locales. De plus, les coûts exorbitants liés au traitement de ces substances viennent renforcer cette pression croissante.

Sur le plan politique, la transposition de la Directive Eau Potable, début 2023, impose un contrôle plus strict sur le suivi des substances polluantes dans les eaux destinées à la consommation humaine. Cette directive inclut également des dispositions spécifiques concernant les PFAS, avec des limites de qualité déjà applicables en France depuis le 1er janvier 2023. Sans actions réglementaires adéquates, le risque de contamination durable est réel, d'autant plus que les connaissances scientifiques sur les effets de ces substances demeurent incomplètes.

Du point de vue technique, les processus de traitement des PFAS et des métabolites de pesticides sont déjà identifiés et mobilisables. Cependant, la traitabilité varie selon la molécule ciblée, et le choix des technologies peut entraîner des défis supplémentaires, notamment en termes de compétition entre substances et de quantités traitées. L'adaptation du traitement aux besoins en termes de qualité de l'eau constitue donc un enjeu majeur.

Face à ces défis environnementaux, politiques et techniques, il est crucial de mettre en œuvre des solutions efficaces et pérennes pour préserver la qualité de l'eau et garantir sa potabilité. Dans ce contexte, cette publication vise à éclairer les collectivités sur la nécessité d'actions afin d'éviter au mieux des transmissions de contaminants aux populations et la diffusions dans l'environnement.



1. Un cadre réglementaire renforcé

1.1. Quelques notions et définitions

1.1.1. Les PFAS

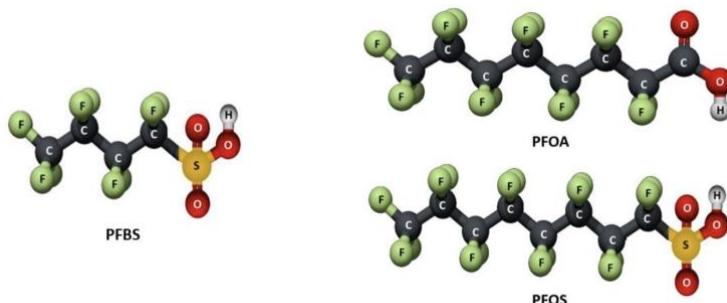
1.1.1.1. Qu'est-ce qu'un PFAS (per- et polyfluoroalkylées) ?

Les PFAS (substances poly- ou perfluoroalkylées) sont des composés de synthèse à chaîne carbonée, où au moins un atome de carbone est complètement substitué par des atomes de fluor. Dans leur caractérisation chimique, sont globalement distingués des PFAS polymères et des PFAS non-polymères, ces derniers étant les plus utilisés.

Largement répandues dans les processus industriels pour leurs propriétés imperméables, antiadhésives ou encore résistante à la chaleur. **D'origines anthropiques**, ces substances composent une famille de molécules à chaînes carbonées de longueur variable, très stables et persistantes, y compris dans l'environnement.

Elles peuvent avoir des **incidences importantes sur la santé humaine et sur l'environnement**.

Très largement utilisées depuis les années 50, sont aujourd'hui dénombrées près de 5000 substances, parmi les plus connues, le PFOA (acide perfluorooctanoïque) et le PFOS (sulfonate de perfluorooctane).



Exemples de PFAS à chaîne carbonée courte (PFBS) et à chaîne carbonée longue (PFOA et PFOS)

Exemples : Textiles imperméables, mousse anti-incendie, polymères de synthèse: PTFE (Polytétrafluoroéthylène, revêtement antiadhésif), PVDF (Polyfluorure de vinylidène, revêtement isolant et anti-corrosion), emballages alimentaires, semi-conducteurs

Avec plus de 200 applications différentes, pour 64 secteurs d'activités, l'usage des PFAS est largement répandu. Ce qui a pour conséquence directe de multiplier les sources d'émissions, et donc d'imprégnation des écosystèmes. Notamment au travers :

- Des émissions des sites de production,
- Des émissions faites pendant le cycle de vie des produits (présence dans les eaux usées, lixiviats et boues de stations d'épuration).

Très mobiles, les PFAS se retrouveront dans toutes les matrices de l'environnement. À savoir : le biote (faune et flore), les sédiments, l'air, les sols et l'eau.

Outre leur ubiquité, les PFAS font également partie des **substances persistantes** dans l'environnement. Toujours en cause, leurs propriétés chimiques très **stables**, qui les rendent très **peu dégradables** naturellement une fois dans l'environnement. C'est la raison pour laquelle ces substances sont aussi appelées « long forever pollutants » ou « **polluants éternels** ».

L'ANSES précise également que plus la substance a une chaîne carbonée longue plus son caractère persistant sera renforcé. Et le PFOA et PFOS sont parmi les plus présentes dans l'environnement.

Cette persistance influera directement la traitabilité de la substance dans les usines de potabilisation de l'eau et les stations d'épuration, puisqu'elles pourront franchir la plupart des barrières de traitement.

1.1.1.2. Effets sur la santé

Les caractères ubiquiste, persistant et même bioaccumulable des PFAS posent des questions sur tous les **effets néfastes et toxiques possibles sur la santé humaine et sur l'environnement**. Le tout étant accentué par les nombreuses sources d'émissions, peuvent contaminer les populations à travers l'alimentation ou l'eau destinée à la consommation humaine (EDCH).

Si les dangers étaient encore peu connus dans les années 50, aujourd'hui plusieurs études viennent combler ce manque d'informations. Parmi les effets notables sur la santé, étayé par un [rapport](#) de l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments :

- Possibilité de **développer des cancers** (le [PFOA classé comme « cancérogène et le PFOS comme cancérogène probable](#) par le Centre International de Recherche sur le Cancer fin 2023) ;
- Effets sur la **fertilité et le développement du fœtus** ;
- Augmentation du taux de cholestérol.

Les PFAS sont également suspectés **d'interférer avec le système endocrinien**.

1.1.1.3. Quel encadrement pour les PFAS ?

Si l'exposition aux PFAS est indéniable, ce qui l'est tout autant est le manque de clarté dont faisait preuve les différentes réglementations (nationales et européennes) sur le sujet.

Niveau international, c'est la Convention internationale de Stockholm (2001) qui régule les PFAS, et plus particulièrement les PFOS et les PFOA. Leur production et utilisation sont interdites respectivement depuis 2009 et 2019. Convention qui a été transposée en droit européen par le Règlement (UE) 2019/1021 sur les polluants organiques persistants (POP). Et depuis 2022, le PFHxS (acide perfluorohexanesulfonique) est également soumis à des restrictions.

Au niveau de l'Union Européenne, plusieurs actions ont d'ores et déjà été engagées. Notamment, des engagements qui, d'une part, visent à renforcer la réglementation sur les substances chimiques et, d'une autre part, compléter les connaissances sur le sujet.

De plus, la stratégie Européenne encadrant les produits chimiques évolue et sont transposées ou sont en cours de transposition en droits nationaux des États membres :

- Directive Cadre sur l'Eau (DCE) : les arrêtés délimitation et surveillance des masses d'eaux ont été révisés (publié le 11 mai 2022). Les nouveaux programmes de suivis intègrent désormais 73 nouvelles substances, dont les 20 PFAS listés par la directive Eau Potable dans les eaux souterraines, et le PFOS pour les eaux de surface. En revanche, hors PFOS, les perfluorés ne sont pas pris en compte dans l'arrêté évaluation.

À noter : Les directives européennes sur l'état des masses d'eaux sont en cours de révision et les propositions de modifications incluent une actualisation de la liste des substances prioritaires à surveiller dont font partie les PFAS, mais également les métabolites de pesticides. Approuvée par le Conseil de l'Union européenne et le Parlement européen, les trilogues débuteront à la fin de l'été." (voir l'[article d'AMORCE](#) sur le sujet)

- Directive eau potable révisée et transposée fin 2022/2023 (Voir [1.2](#)), indique les nouveaux paramètres à prendre en compte pour les PFAS.



- Réglementation REACH, la feuille de route qui avait été présentée en 2022 par la Commission européenne notait la volonté de restreindre de nombreuses substances nocives pour la santé et l'environnement, dont font partie un grand nombre de PFAS. Et plusieurs molécules sont d'ores et déjà dans le règlement, classées et soumises à restrictions. À l'instar du PFOA et PFOS, déjà mentionnées, mais également du PFCA. Ces molécules entrent dans le cadre de l'Annexe XVII sur les restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses.

En octobre 2023, la Commission européenne reporte la révision de REACH jusqu'à nouvel ordre mais certaines modalités pourraient être susceptibles d'évoluer, notamment pour intégrer plus de PFAS.

Bien que certains pays soient en faveur d'une interdiction totale des PFAS, la proposition de loi sera étudiée en 2025, la tendance est plus à la restriction sauf pour les usages dits « essentiels » (notion qui sera à définir par la commission).

Exemple : PFAS utilisés pour la production d'hydrogène pourront être jugés « essentiels ». Ça ne sera pas le cas pour les PFAS dans les produits de fartage de skis ou les poêles. Cas particulier pour les semi-conducteurs, possibilité de remplacer les PFAS progressivement mais mesure pas immédiate.

Toute ces évolutions font le lien avec le Pacte Vert qui porte la vision durable de l'Union Européenne et qui, à l'horizon 2030 doit tendre vers un environnement sans substances toxiques.

En complément :

- Depuis le 1er janvier 2023, une valeur d'émission spécifique pour les PFOS (sous-famille des PFAS des plus persistantes) sera fixée pour les rejets des ICPE dans le milieu naturel, de 25 µg/L. Une surveillance mensuelle ou trimestrielle devra être assurée au-delà de certains flux journaliers (articles 32 et 60 de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 modifié).
- Certaines installations de traitement de déchets, relevant du régime de l'autorisation et de la directive relative aux émissions industrielles (dite « IED »), intègrent une surveillance semestrielle du PFOS et du PFOA au niveau des effluents aqueux (arrêté du 17 décembre 2019).

1.1.2. Les pesticides

1.1.2.1. La notion de métabolites de pesticides

Le terme « pesticide » désigne une famille hétérogène de substances utilisées dans la prévention, le contrôle ou l'élimination d'organismes indésirables tels que plantes, animaux (insectes, acariens, mollusques, etc.), champignons ou bactéries.

Cette catégorie englobe plus de 1000 molécules aux structures chimiques, propriétés et modes d'action divers. Parmi elles, se trouvent les produits phytopharmaceutiques ou phytosanitaires pour la protection des plantes, les produits biocides pour éliminer les organismes cibles comme les insectes ou les rongeurs, ainsi que les produits antiparasitaires utilisés chez les animaux, tels que les antipuces.

Lorsqu'ils se dispersent dans l'environnement, les pesticides peuvent se transformer et/ou se dégrader en une ou plusieurs autres molécules appelées « métabolites ». Certains métabolites résultent également de réactions ou de recombinaisons. On distingue ainsi les molécules mères (les pesticides) des molécules filles (les métabolites).

Un métabolite de pesticide est le produit de la dégradation d'une molécule mère, que ce soit par des processus biologiques (microorganismes, etc.) ou physico-chimiques (hydrolyse, exposition aux UV, etc.). Une molécule mère peut générer un ou plusieurs métabolites. Il convient de différencier les métabolites des produits de transformation, qui résultent de réactions chimiques entre la substance active, ses métabolites et les produits utilisés pour traiter l'eau en vue de sa potabilisation.

Exemples connus de pesticides et de leurs métabolites :

- *S-métolachlore (herbicide) et ses métabolites ESA métolachlore, NOA métolachlore et OXA métolachlore*
- *Chlorothalonil (fongicide) et ses métabolites R471811, R 417888, 4-hydroxy-chlorothalonil, 471811*
- *Glyphosate (herbicide) et son métabolite AMPA*

1.1.2.2. Effets sur la santé et l'environnement

Forts de nombreuses années de recherches, les effets des pesticides sur la santé humaine et l'environnement sont connus et documentés.

L'exposition aux pesticides peut entraîner diverses maladies cardiovasculaires, neurodégénératives comme Alzheimer et Parkinson, des maladies congénitales, et des insuffisances rénales chroniques. De plus, l'exposition à certains pesticides peut être à l'origine de divers types de cancer.

Par exemple, une courte durée d'exposition à l'atrazine au-dessus de la valeur maximum de concentration permise pour l'eau potable peut causer congestion rénale, hypotension artérielle, perte de poids et dommages aux glandes surrénales. Une exposition à long terme peut engendrer des maladies cardiovasculaires, divers types de cancer, la dégénérescence musculaire et de la rétine. De surcroît, l'atrazine est considérée comme un perturbateur endocrinien.

Sur l'environnement et la biodiversité, l'atrazine est notée毒ique pour les micro-organismes et les familles d'amphibiens, résultant en des diminutions significatives de populations d'espèces et des retards de développement.

1.1.2.3. Quel encadrement pour les pesticides dans les eaux potables ?

La directive européenne 2020/2184 définit un métabolite de pesticide comme pertinent pour les eaux destinées à la consommation humaine s'il présente des propriétés intrinsèques comparables à celles de la substance mère en termes d'activité pesticide cible, ou s'il représente un risque sanitaire pour les consommateurs par lui-même ou par ses produits de transformation. Les critères et les modalités d'évaluation pour déterminer la pertinence des métabolites de pesticides dans les eaux de consommation n'ont pas encore été établis au niveau européen, laissant cette responsabilité à chaque État membre. En France, c'est l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui est chargée d'évaluer la pertinence des métabolites pour les eaux potables, selon l'état des connaissances scientifiques disponibles. Ce statut pertinent/non pertinent peut évoluer au fil du temps.

Cette [méthode d'évaluation](#) de pertinence comprend plusieurs étapes :

- Études de l'activité biologique du métabolite pour déterminer s'il conserve des effets pesticides.
- Examens des effets potentiels sur la santé du métabolite et/ou de la substance mère, incluant :
 - Mutagénicité,
 - Génotoxicité,
 - Cancérogénicité,
 - Perturbation endocrinienne.
- Évaluation du potentiel de transformation dans les processus de traitement de l'eau.

Dans cette évaluation, le classement de la substance active mère comme CMR avéré (Cancérogène, Mutagène ou Reprotoxique : CMR1) ou Perturbateur endocrinien est pris en compte pour définir le métabolite comme pertinent par défaut d'étude spécifique.

Par opposition, un métabolite non pertinent n'a plus d'effet pesticide et est considéré comme ayant une toxicité non significative pour la santé humaine. Par mesure de précaution, un métabolite non encore caractérisé selon cette méthode est considéré pertinent.



Dans un avis de janvier 2019, l'ANSES précise qu'« Un métabolite de pesticides est jugé pertinent pour les EDCH s'il y a lieu de considérer qu'il pourrait engendrer (lui-même ou ses produits de transformation) un risque sanitaire inacceptable pour le consommateur ». Si aucun avis officiel n'est donné, alors les « métabolites dont la pertinence n'a pas été caractérisée ».

1.2. La directive eau potable

La directive 2020/2184 (ou « Directive Eau Potable), du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, communément appelée "eau potable", a été transposée fin 2022 dans le droit français.

Cette directive fait évoluer le cadre de protection de la ressource en eau, en imposant de nouvelles obligations pour les collectivités compétentes en « eau potable », notamment en ce qui concerne les attentes en matière de qualité au niveau des captages.

1.2.1. De nouvelles normes et paramètres pour une eau de qualité

Entrés en application depuis le 1er janvier 2023, deux arrêtés précisent les nouvelles attentes en matière de qualité d'eau potable.

Le premier fait évoluer les limites et les références de qualité (datant de 2007) qui s'appliquent aux eaux brutes utilisées pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et aux EDCH elles-mêmes, faisant également entrer les PFAS dans l'obligation de suivi et précise les attentes sur les pesticides/métabolites de pesticides, pertinents ou non.

Le second redéfinit les procédures de dérogation à ces limites (modifie l'arrêté du 25 novembre 2003).

À titre informatif, la qualité d'une EDCH est jugée « non conforme » pour un, ou plusieurs paramètres, si un dépassement de limite de qualité réglementaire est constaté, et que cette dernière ne peut être rétablie à court terme (moins de 30 jours).

1.2.1.1. PFAS

La transposition de la Directive Eau Potable introduit des références de qualité pour les PFAS dans l'eau potable, un enjeu crucial pour la santé publique et la préservation de l'environnement.

Depuis le 1er janvier 2023, les nouvelles limites de qualité pour ces substances dans les EDCH sont fixées à 0,1 µg/L pour la « somme de 20 PFAS » définis par la Directive Européenne. Dans les eaux brutes destinées à la production d'eau potable, cette limite remonte à 2 µg/L.

L'arrêté relatif aux limites et références de qualité précise également qu'un suivi analytique systématique sera mis en place par les Agences Régionales de Santé (ARS) à partir du 1^{er} janvier 2026. Ce délai permettra aux laboratoires de se préparer en termes d'accréditations, de capacités analytiques et de contrats. Cependant, les ARS pourront anticiper ce suivi en cas de suspicions d'une contamination des eaux par les PFAS, comme c'est déjà le cas pour des collectivités comme la Métropole de Lyon ou Rumilly Terre de Savoie.

Il semble utile de préciser qu'une limite de qualité réglementaire ne correspond pas à une valeur sanitaire mais à une valeur de gestion. Pour les pesticides pertinents comme pour les PFAS, c'est le dépassement de la donnée sanitaire qui fera foi dans le risque pour la santé des consommateurs, si elle existe. Il n'en reste pas moins que ces substances sont des indésirables dans les EDCH.



Les valeurs sanitaires associées à ces paramètres sont définies par l'ANSES ou par recommandation du Haut conseil de la santé publique. Actuellement, le processus d'élaboration des valeurs sanitaires pour les PFAS est en cours et ces dernières sont attendues pour 2024.

Tout dépassement de limite de qualité sera considéré comme une « non-conformité » vis-à-vis de la réglementation. Toutefois, avec le cas particulier des PFAS, des prélèvements supplémentaires, ou « recontrôles », sont nécessaires afin de vérifier et confirmer ces résultats dans le temps.

Dans l'évaluation des « non-conformités » des eaux par les PFAS, les ARS suggèrent de prendre en compte la « chronicité » de leur présence, avant de parvenir à une confirmation. Ces critères sont les suivants :

- **Cas 1** : Si le prélèvement initial et son recontrôle révèlent des concentrations supérieures à 0,1 µg/L pour la somme des 20 PFAS, ou si deux prélèvements dépassent cette valeur au cours d'une période d'un an, la situation de non-conformité est confirmée. Dans ce cas, la PRPDE (Personne Responsable de la Production et/ou de la Distribution de l'Eau) est informée par l'ARS de la situation.
- **Cas 2** : Si un seul prélèvement révèle une concentration supérieure à 0,1 µg/L pour la somme des 20 PFAS sur une période d'un an, la situation est considérée comme « à confirmer ». Le suivi des PFAS est maintenu, avec la possibilité de renforcer le contrôle sanitaire si les valeurs approchent de la limite de qualité.
- **Cas 3** : Si tous les prélèvements présentent des concentrations inférieures à 0,1 µg/L pour la somme des 20 PFAS sur une période d'un an, la situation est conforme.
 - **Cas 3-1** : En cas de quantification de PFAS sur un ou plusieurs prélèvements, le suivi est maintenu quatre fois par an, avec la possibilité de renforcer le contrôle sanitaire si les valeurs approchent de la limite de qualité.
 - **Cas 3-2** : En l'absence de quantification de PFAS, le suivi spécifique est interrompu, et l'attente se porte sur la mise en œuvre du contrôle sanitaire à partir du 01/01/2026.

Cette approche est justifiée par plusieurs facteurs, notamment :

- La constatation de fortes variations dans les résultats dans certaines situations.
- Le fait que la plupart des résultats se situent autour de 0,1 µg/L, avec une variabilité des résultats plus élevée à mesure que l'analyse se rapproche de cette limite, comme l'a rapporté l'ANSES.
- L'amélioration continue de la fiabilité analytique des laboratoires de contrôle.

Chaque situation est donc évaluée individuellement, et en cas de « non-conformité » confirmée, la position interministérielle provisoire de gestion est appliquée : L'usage de l'eau distribuée n'est pas restreint mais un plan d'actions est mis en œuvre afin de rétablir la qualité dans les meilleurs délais.

Ce processus de contrôle rigoureux doit garantir la conformité de qualité des EDCH. Cependant, AMORCE assure qu'il est primordial de **mettre en place des actions de communication et de sensibilisation systématiques** pour informer sur l'ampleur des non-conformités détectées. Et ainsi, assurer transparence et prise de conscience pour le public.

Liste des 20 PFAS recherchés dans l'eau potable (code paramètre SANDRE entre crochets)

- | | |
|--|--|
| - Acide perfluorooctanoïque (PFOA) [5347] | - Acide perfluoroheptane sulfonique (PFHpS) [6542] |
| - Acide perfluoroheptanoïque (PFHpA) [5977] | - Acide perfluorotridecanoïque (PFTrDA) [6549] |
| - Acide perfluorohexanoïque (PFHxA) [5978] | - Acide perfluorodécane sulfonique (PFDS) [6550] |
| - Acide perfluoropentanoïque (PFPeA) [5979] | - Acide perfluorooctane sulfonique (PFOS) [6561] |
| - Acide perfluorobutanoïque (PFBA) [5980] | - Acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS) [6830] |
| - Acide perfluorobutane sulfonique (PFBS) [6025] | - Acide perfluoropentane sulfonique (PFPeS) [8738] |
| - Acide perfluorododécaneoïque (PFDoDA) [6507] | - Acide perfluorononane sulfonique (PFNS) [8739] |
| - Acide perfluorononanoïque (PFNA) [6508] | - Acide perfluoroundécane sulfonique [8740] |
| - Acide perfluorodécaneoïque (PFDA) [6509] | |
| - Acide perfluoroundécaneoïque (PFUnDA) [6510] | |

- Acide perfluorododécane sulfonylique [8741]

- Acide perfluorotridécane sulfonylique [8742]

1.2.1.2. Pesticides et métabolites

Au sens de la réglementation dans les EDCH et à partir de la définition écrite plus haut, les pesticides recouvrent l'ensemble des produits organiques ainsi que leurs produits de décomposition dans l'environnement classés comme métabolites pertinents, y compris leurs produits de transformation.

Avec la nouvelle Directive Eau Potable et les arrêtés de transposition qui lui sont associés, il est désormais plus facile de comprendre quelles sont les exigences de qualités associées aux pesticides et à leur métabolites. En effet, la notion de « pertinence » introduite en [1.1.2.2](#) permet de définir les seuils de gestion pour l'ensemble des substances.

Concernant les pesticides et leurs métabolites pertinents, il existe deux seuils de référence :

- Limite Réglementaire : Fixée à 0,1 µg/L pour l'ensemble des molécules dans les eaux distribuées, la limite de qualité constitue un seuil réglementaire à ne pas dépasser. En cas de dépassement de cette limite, mais avec une concentration demeurant en dessous de la valeur sanitaire, l'eau peut être consommée. Toutefois, des actions doivent être prises par le PRPDE et peuvent être imposées par le préfet pour rétablir rapidement sa conformité, le cas échéant, dans le cadre d'une dérogation.
- Valeur Sanitaire (V_{max}) : Chaque molécule possède une valeur sanitaire spécifique, déterminée en fonction de l'état des connaissances disponibles à son sujet. En cas de dépassement de cette valeur, la consommation de l'eau est strictement interdite, compte tenu des risques pour la santé publique.

Également incluse dans l'arrêté relatif aux limites et références de qualité, la somme des pesticides, et métabolites, pertinents est fixée à **0,5 µg/L** (5 µg/L dans les eaux brutes).

Font **exception** à la limite de 0,1 µg/L : l'aldrine, la diechloréthane, l'heptachlore et l'heptachlorépoxyde, qui ont fait l'objet d'une étude de toxicité spécifique, et pour lesquelles la limite de qualité est fixée à 0,03 µg/L.

Cet ensemble de données et d'informations donnent lieu à 4 situations, ici pour un seul pesticide/métabolite :

- **Eau conforme** vis-à-vis de la limite de qualité « Pesticides » pour la substance nouvellement quantifiée
- **Situation NC0** : Eau non-conforme à la limite de qualité « Pesticides » pour la substance nouvellement quantifiée (0,1 µg/L) – dépassement ponctuel de la limite de qualité
- **Situation NC1** : Eau non-conforme à la limite de qualité « Pesticides » pour la substance nouvellement quantifiée (0,1 µg/L) – dépassement récurrent de la limite de qualité
- **Situation NC2** : Présence du pesticide en quantité inacceptable sanitairement, quelle que soit la durée de dépassement de la V_{max} (valeur sanitaire maximale) ou de la VST (valeur sanitaire transitoire)

Le guide de l'ASTEE issu du GT Pesticides, auquel AMORCE a participé, propose de revenir en détails sur la gestion des situations « NC » indiquant des dépassements des limites de qualité des pesticides et métabolites de pesticides pertinents afin de guider au mieux les PRPDE.

Est jugé inacceptable sanitairement, tout pesticide dans l'eau dont la concentration dépasse la valeur sanitaire maximale (V_{max}) ou la Valeur Sanitaire Transitoire (VST) définie pour cette molécule. S'il n'existe ni V_{max} , ni VST alors le seuil est automatiquement fixé à 0,1 µg/L.

La VST (Valeur Sanitaire Transitoire) gère temporairement les dépassements des limites de qualité pour les métabolites dont la pertinence et la V_{max} n'ont pas encore été définies par l'ANSES. Introduite suite à une instruction ministérielle de mai 2022, elle se base sur la valeur définie par l'UBA (Umweltbundesamt), Agence fédérale pour l'environnement en Allemagne, fixée à 1 ou 3 µg/L suivant le profil toxicologique de la molécule.

Pour les métabolites de pesticides non pertinents, ils sont exclus du calcul pour la somme des pesticides. Ces derniers sont d'ailleurs concernés par une limite réglementaire fixée à 0,9 µg/L.

C'est une valeur indicative, si la concentration de la molécule est dessous de cette valeur, alors l'eau est considérée comme sans risque pour le consommateur. Au-delà, des mesures correctives adaptées doivent être mises en œuvre mais ces dernières n'entraînent pas d'arrêt de distribution d'eau ou de demande de dérogation.

Que se passe-t-il en cas de dépassement de limite de qualité réglementaire ?

Pour les molécules dont les concentrations dépassent les valeurs indicatives ou seuils réglementaires, les collectivités impactées et les PRPDE sont dans l'obligation de prendre des mesures pour corriger la contamination de leur ressource.

Or peu d'alternatives à court-terme existent pour les collectivités :

- Soit l'abandon des captages mis en causes, dans le cas où elles disposent d'une ressource non polluée disponible et interconnectée au service,
- Soit l'interconnexion avec une eau moins polluée afin de diluer la problématique et poursuivre la distribution.
- Soit solliciter une dérogation préfectorale pour continuer à distribuer cette eau, car malgré le dépassement du seuil réglementaire, il arrive que la concentration du métabolite reste en dessous du seuil sanitaire (V_{max}). En revanche, la collectivité doit mettre en place un plan d'actions sur 3 ans pour restaurer la qualité de l'eau et doit, évidemment, en informer ses usagers.

La dérogation, encadrée par le Code de la Santé Publique (art R. 1321-31), est une procédure réglementaire permettant de gérer les dépassements des limites de qualité de l'eau potable. Initiée par la PRPDE, elle nécessite une demande adressée au préfet, qui statue par arrêté préfectoral après examen du rapport de l'ARS. Cette demande doit obligatoirement inclure un plan d'action visant à restaurer la qualité de l'eau distribuée. La durée de la dérogation est limitée à trois ans maximum, durant lesquels la PRPDE doit mettre en œuvre des mesures correctives. Dans des circonstances exceptionnelles, une seule prolongation peut être accordée.

Dans le cas d'une demande de dérogation, l'arrêté relatif aux modalités de demande de dérogation aux limites de qualité des EDCH précise que le plan d'actions correctives devra comprendre : le descriptif des solutions envisagées et leur calendrier de mise en œuvre, un estimatif des coûts des mesures et les indicateurs de suivi de situation. Elles doivent également fournir les informations sur le PGSSE (Plans de Gestion de la Sécurité Sanitaire de l'Eau) en cours, car rendu obligatoire par la Directive Eau potable ([voir l'article d'AMORCE](#)).

Le décret n°2022-1720 du 29 décembre 2022 relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine précise qu'une dérogation ne peut être demandée, uniquement dans les cas suivants :

- « Une nouvelle ressource est utilisée pour la production d'EDCH » ;
- « Une nouvelle source de pollution est détectée dans la zone de captage utilisée pour la production de l'EDCH, ou des paramètres chimiques ont fait l'objet d'une recherche récente ou d'une détection récente » ;
- « Une situation imprévue et exceptionnelle est survenue concernant une ressource déjà utilisée pour la production d'EDCH et pouvant conduire à des dépassements temporaires faibles des limites de qualité ».

Les V_{max} pour les molécules pertinentes sont disponibles sur le [site de l'ANSES](#), les VST sont sur le [site de l'UBA](#).

Nota : Au même titre que l'atrazine ou encore l'heptachlore font partie des pesticides recherchés dans les EDCH malgré leur interdiction au début des années 2000, le PFOA et le PFOS sont deux perfluorés respectivement interdits depuis 2019 et 2003 mais intégrés dans la liste des substances à surveiller.



En 2020, près de 50% des déclassements de captages était dus aux S-métolachlore et ses métabolites (ESA, NOA et OXA métolachlore). En cause l'absence d'informations sur la génotoxicité, rendant de fait les sous-produits de dégradation « pertinents par défaut », faisant ainsi appliquer de fait la limite de 0,1 µg/L. Cette limite a obligé de nombreuses collectivités à s'adapter et à mettre en place les alternatives court-termes sus-citées, jusqu'à octobre 2022 où l'ANSES requalifie les 3 métabolites en « non-pertinent ».

Une situation similaire s'est déroulée entre 2022 et 2024, où le R471811, métabolite du Chlorothalonil, est passé successivement de « pertinent par défaut » à « non pertinent ». Le problème ici est, qu'entre ces périodes, il est demandé aux collectivités une adaptation rapide face à des molécules pas/peu recherchées dans les eaux jusqu'alors. Ce sont des coûts supplémentaires (analyses, gestion et/ou traitement) à intégrer aux budgets des services.

→ **Les informations relatives aux pesticides et PFAS évoluant constamment, restez connectés aux services d'AMORCE (LAA, NL, communauté) pour suivre toutes les évolutions.**

1.3. L'ambition de la France face aux PFAS

En 2022, le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires a mené des travaux pour structurer son action au regard des préoccupations grandissantes face aux PFAS. Début 2023 et mis à jour en 2024, le **plan d'action ministériel sur les PFAS** était dévoilé, avec un objectif concret d'améliorer les connaissances et de réduire les risques d'exposition.

Dans ce cadre, le député Cyrille ISAAC-SIBILLE a été missionné pour faire un diagnostic de situation en France sur les usages et la contamination des milieux par les PFAS. Rendu en février 2024, ce bilan a également été l'occasion de donner lieu à 18 recommandations et une feuille de route, pour sortir de l'utilisation systématique des PFAS dans la fabrication de produits du quotidien et de ne réserver ces substances pour les usages dits « essentiels ».

S'appuyant, entre autres, sur ce rapport, une proposition de loi a été fait à l'Assemblée nationale. Adoptée en première lecture, ce texte vise à « Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées »

Composée de trois articles, la proposition prévoit, à compter du **1er janvier 2026, l'interdiction de la fabrication, l'importation et la vente** de produits tels que les produits de fast-food, les cosmétiques et les textiles d'habillement contenant des PFAS, à l'exception des vêtements de protection pour les professionnels de la sécurité (liste précisée par décret).

Au **1er janvier 2030**, seront également interdits, la fabrication, l'importation, l'exportation et la mise sur le marché à titre onéreux ou gratuit de **tout produit textile contenant des PFAS**.

Les produits ciblés sont ceux identifiés par la feuille de route de la réglementation sur les produits chimiques « REACH » (dont la révision n'est plus d'actualité), qui propose une restriction des PFAS sur les produits « non-essentiels », dont il a déjà été question plus haut dans ce dossier.

Pour une meilleure prise en compte analytique et pour amorcer une trajectoire concrète de dépollution, la PPL propose de rendre systématique l'analyse des PFAS dans le contrôle sanitaire de la qualité des EDCH, anticipant la date butoir de 2026 de la DAEP. Par ailleurs, sur avis de l'ANSES, un décret établira une **liste des**



PFAS à contrôler, ainsi que les conditions d'échantillonnage. La liste des 20 molécules à surveiller étant jugée largement insuffisante.

Elle propose également de dresser une liste exhaustive des pollutions par les PFAS, de **cartographier les sites émetteurs** de ces substances et de définir des **seuils maximaux d'émission** ainsi que des **actions de dépollution**.

La proposition de loi engage également le gouvernement à élaborer une trajectoire de dépollution des eaux et des sols contaminés par les PFAS, en commençant par l'élimination progressive, en 5 ans, des rejets aqueux des installations industrielles.

Évidemment, la dépollution ne pourra pas se faire au détriment des collectivités, à qui il est nécessaire de donner les moyens financiers d'agir.

En s'appuyant sur le principe du pollueur-payeur, la PPL instaure une **redevance** « due par un exploitant d'une installation soumise à autorisation dont les activités entraînent des rejets de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées ». Perçue par les Agences de l'eau, cette redevance est calculée en fonction de la quantité de PFAS rejetée chaque année dans l'environnement, directement ou via un réseau de collecte. La redevance est fixée à partir d'un seuil de cent grammes, avec un **montant de 100 euros pour chaque tranche de cent grammes de substances rejetées**. Cette mesure vise à garantir que les entreprises assument leur responsabilité dans la dépollution, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

En suspens depuis juillet 2024, l'étude de cette loi reprendra potentiellement courant 2025.

1.4. Effets du changement climatique sur la qualité des eaux

Les effets du changement climatique sur les ressources en eau sont multiples et préoccupants. En ce qui concerne les eaux de surface, le changement climatique va entraîner une diminution significative du débit des rivières en France, avec une baisse prévue de 40 à 80% d'ici à 2080. Cette diminution va rendre les milieux récepteurs plus vulnérables aux pollutions, ce qui nécessitera la mise en place de réglementations plus contraignantes pour les protéger.

En ce qui concerne les eaux souterraines, le changement climatique va également avoir des impacts importants. Les niveaux de nappes vont être modifiés, ainsi que leur vitesse et leur fréquence de renouvellement, en particulier dans les zones karstiques. Cela peut entraîner des modifications des concentrations en matières organiques, ainsi que des sollicitations de couches géologiques différentes. Les variations de la concentration en pesticides et métabolites, ainsi que la dégradation de la teneur globale en micropolluants, sont également des conséquences possibles du changement climatique sur les eaux de forage.

Il est donc essentiel de prendre en compte les effets du changement climatique dans la gestion des ressources en eau, en particulier dans la protection des milieux récepteurs et la préservation de la qualité de l'eau potable.

Des solutions techniques telles que le charbon actif et l'osmose inverse basse pression peuvent aider à répondre aux nouveaux défis liés aux micropolluants et aux changements climatiques, mais une approche holistique est nécessaire pour garantir une gestion durable et efficace de l'eau potable en France.



2. Défis et vigilance : Coûts, Risques et Contraintes

2.1. Quelle présence dans les milieux ?

Concernant les métabolites de pesticides, en juin 2023, AMORCE a mené une enquête auprès d'un large panel de collectivités afin de pouvoir évaluer au mieux les défis rencontrés par les services publics d'eau potable.

Les résultats révèlent une situation préoccupante : sur un panel représentant 4,3 millions d'habitants, 92% des collectivités signalent avoir identifié des pollutions émergentes, principalement des métabolites de pesticides, sur certains de leurs captages. Parmi ces collectivités identifiant ces polluants, **73%** font face à des non-conformités, affectant environ **30% de leurs captages**.

Les substances les plus fréquemment détectées incluent le chlorothalonil et son métabolite R471811, le S-métolachlore et ses métabolites, les métabolites du chlordiazone, des PFAS comme le TFA (Acide trifluoroacétique), les nitrates, le tetrachloroéthylène et le ESA alachlor.



*Soit une très grande majorité de **produits phytosanitaires**, dont certains interdits depuis plusieurs années, mais également une partie de **perfluorés**.*

Selon le [dernier bilan annuel sur la qualité de l'eau potable](#) établit par le ministère de la Santé, 15% de la population est alimentée par une eau potable était non conforme sur les paramètres pesticides/métabolites, contre seulement 2% pour les paramètres nitrates, fluor ou bactériologiques. À l'origine de ces déclassements : le métolachlore, le chlorothalonil et l'atrazine.

Pour les pesticides, le contrôle sanitaire mené par les ARS et l'autosurveillance par les PRPDE permettent une quantification rigoureuse des molécules recherchées. En revanche, cela dépendra nécessairement

Pour les PFAS, dans son [rapport](#) rendu au gouvernement en février 2024, le député Cyrille ISAAC-SIBILLE appelle à approfondir les connaissances sur le sujet, notamment en dressant une liste exhaustive de l'ensemble des pollutions (sources et matrices touchées). C'est également ce que propose la proposition de loi visant à « Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées », introduite plus haut dans ce document, puisqu'elle propose de **cartographier les sites émetteurs** ou ayant potentiellement rejetés des PFAS. Puis, sur le fondement de cette carte, pourront être répertoriées les **communes exposées** à un risque élevé ou très élevé d'exposition aux PFAS. Cette liste sera rendue publique et donnera lieu à des recommandations émises par les ARS, afin de guider les mesures préventives.

Pour le moment, pas ou peu d'études montrent précisément l'état de contaminations des masses d'eaux aux PFAS, cependant :

- En 2010, une première campagne nationale de caractérisation avait été menée sur 10 PFAS → **25% des eaux brutes contenaient au moins un PFAS** avec une concentration supérieure à la limite de quantification. (Ce qui, depuis la révision de la Directive Cadre sur l'eau, aurait exclu ces masses d'eaux du « Bon État » écologique au sens de la DCE)
- Chiffre similaire issu de l'enquête AMORCE sur la présence de polluants émergents dans les captages d'eau potable (**25% des répondants détectent des PFAS** ou substances similaires)
- Dans le cadre de l'enquête collaborative « Forever Pollution Project », une [carte des contaminations](#) aux PFAS en Europe a été réalisée.

Pour la DCE et à l'état des masses d'eaux, ce sont les données chimiques qui font foi. Selon le dernier état des lieux ([EauFrance](#), 2019) :

- **67%** des eaux de surface sont en « Bon État ». Les HAP, pesticides et métaux lourds étant à l'origine du déclassement de 33% restant.

- **71%** des eaux souterraines sont en « Bon État ». Les pesticides et nitrates étant à l'origine de la plupart des déclassements.

2.2. Analyses et coûts des actions

A mesure que les connaissances évoluent, la pertinence de nouveaux pesticides et de métabolites est établie. Face à ces alertes, les collectivités sont contraintes d'instaurer des plans d'actions pour maintenir et/ou restaurer la qualité de l'eau. Toutefois, maintenir une alimentation en eau potable de qualité s'effectue dans des conditions de plus en plus difficiles en raison de contraintes quantitatives ou qualitatives, ou circonstanciel, comme en cas de sécheresse.

Dans ce contexte, les collectivités sont parfois contraintes de substituer une ressource de captage par une autre voire d'abandonner un captage pollué pour garantir la qualité de l'eau potable à leurs administrés, entraînant des contraintes et des conséquences lourdes.

Dans le cas du présent document, et dans le périmètre de captages pollués (pesticides ou PFAS), les enjeux de la dépollution sont lourds - en particulier du fait de la persistance de ces substances.

Un [rapport](#) du CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable, ancien IGEDD) estime les surcoûts de traitement des pesticides pour les eaux potables seraient compris entre 260 et 360 M€ par an en France. Auxquels devront nécessairement s'ajouter des actions préventives de régulation à la source afin d'éviter les recontaminations ou l'accumulation de substances nocives dans les milieux aquatiques.

En ce qui concerne les PFAS, il n'y a que **peu d'évaluations financières**. Et avec l'absence de normes spécifiques sur ces substances dans les différentes matrices environnementales, telles que les EDCH, les rejets atmosphériques et les déchets, il est difficile de garantir des performances environnementales adéquates.

Cette absence de seuils écarte les PFAS des études d'impact ou de toxicité sur les milieux bien qu'ils soient un facteur important de nocivité. Leur mise en place est donc indispensable pour réglementer l'utilisation des perfluorés et ainsi, mieux conditionner les rejets, leur traitement ou leur élimination. Ceci, afin d'assurer leur prise en compte dans la protection de l'environnement et de la santé publique. Mais également pour mieux réguler les installations susceptibles d'utiliser des PFAS.

Toutefois, il existe une [analyse](#) faite par le Bureau européen de l'environnement (ONG), qui estime le coût total du traitement des eaux potable et usées pour éliminer les PFAS à **238 milliards d'euros par an dans l'ensemble de l'Union Européenne**.

Le [rapport PFAS](#) du député Cyrille ISAAC-SIBILLE explicite néanmoins deux exemples, afin d'illustrer les coûts importants de la dépollution dans les eaux brutes utilisées pour la production d'eau potable :

- L'association technique et scientifique allemande pour le gaz et l'eau (DVGW) fait état d'un coût de traitement supplémentaire de **3,66 M€ par an** pour traiter, par charbon actif, 16 millions de mètres cubes d'eau brute susceptible de conduire à des non-conformités liées aux critères de la Directive Eau Potable. Pour les usagers, cela pourrait revenir à un surcoût moyen supérieur à 20 centimes par mètre cube, voire jusqu'à 1 euro suivant la qualité de l'eau et le traitement en place.
- L'association européenne des services d'eau potable et d'assainissement, EurEau, estime que le traitement par osmose inverse augmenterait le prix du traitement de l'eau de plus de 0,5 à 1 euro/m³, ce qui se traduirait par un coût supplémentaire d'environ 200 euros par an par ménage moyen.

Concernant la France, les premières projections pour l'eau potable sont de l'ordre de dizaines de centimes d'euros au mètre cube.

Enfin, si les méthodes analytiques de détection des métabolites de pesticides sont déjà bien éprouvées, la caractérisation de la présence de PFAS dans l'environnement est complexe. À la fois du fait de la multitude des substances et des concentrations faibles auxquelles on les rencontre. Les techniques d'analyse sont en cours d'évolution et font l'objet de recherches, en particulier aux Etats-Unis (US EPA). On distingue deux types de méthodes appliquées pour les matrices eaux, sols, sédiments, biote :



- les analyses « spécifiques » visant à détecter et quantifier une substance donnée. Une quarantaine de PFAS peut être analysée avec des limites de quantification très faibles, de l'ordre de 2 ng/l;
- les méthodes d'analyse « globales » permettent d'estimer la pollution globale en PFAS sans permettre d'identifier les substances de manière individuelle.

Selon les évolutions réglementaires, une méthode pourrait être préférée à l'autre. En effet, dans le cadre d'une interdiction globale de la famille PFAS, la méthode analytique pourrait tendre vers une évaluation générale.

Retour d'expérience : L'observatoire de l'eau du Département de Seine et Marne

Le Département de Seine-et-Marne a publié, en 2015, les résultats de son observatoire de l'eau dédié aux questions des coûts des opérations de gestion de la ressource.

S'appuyant, tant sur des données financières que techniques, le document propose une analyse statistique des coûts des opérations dans le domaine de l'eau retenues et financées par le département entre 2004 et 2015. L'analyse permet de définir, pour chacune des opérations citées, une fourchette de coûts HT minimaux et maximaux sur la base de ce qui a été observé dans les dossiers passés.

D'un point de vue réglementaire, l'amélioration de la transparence de la vie publique est un enjeu repris dans la loi du 7 août 2015 portant Nouvelle organisation territoriale de la république (NOTRe), afin de favoriser la transmission d'informations relatives à la gestion des collectivités territoriales.

L'objectif de cet observatoire est de fournir une analyse des coûts d'opération dans les différentes thématiques de l'eau, afin d'améliorer la connaissance des dépenses en investissement pour les collectivités, les financeurs et les usagers. Il vise à assurer la transparence des projets et à aider les collectivités à faire des choix budgétaires éclairés pour mieux gérer les contraintes des dépenses d'investissement.

Pour les opérations relatives à l'eau potable, le présent document a fait le parti-pris de ne s'intéresser uniquement aux opérations de traitement de gestion de la ressource :

Opération	Variable technique	Intervalle de confiance	Formule
Interconnexion de réseau	Linéaire de réseau (en m)	De 450 à 67 000 m	Prix théorique = 225,8 (+ ou - 9,9) x linéaire de réseau + 299 881 (+ ou - 169 697)
Usine de traitement des pesticides	Capacité de traitement (en m ³ /h)	De 60 à 550 m ³ /h	Prix théorique = 23 713 (+ ou - 1 920) x capacité de traitement - 849 257 (+ ou - 463 462)
Etude environnementale des périmètres de protection de captage	-	-	Le coût de l'étude environnementale peut être compris entre 10 000 € HT et 27 400 € HT.

2.3. L'avis d'AMORCE

Bien qu'AMORCE soit favorable à une hausse de la tarification des services d'eaux en France, elle ne doit en aucun cas se faire au détriment de l'usager, en particulier si ces augmentations sont compensatoires. En effet, AMORCE ne juge pas acceptable de laisser les collectivités démunies de moyens d'actions pour lutter contre



la prolifération des pollutions émergentes dans leurs captages. Il en va de la responsabilité de l'État d'instaurer des taxations réellement dissuasives qui ne soit pas de simple droit à polluer.

En application du principe fondamental du « pollueur-payeur », AMORCE défend la création de nouvelles sources de financement pour **accompagner les collectivités dans les investissements nécessaires** pour garantir la qualité des EDCH. AMORCE pousse notamment à une réforme profonde des redevances perçues par les Agences de l'eau. Outre un rééquilibrage des taxes sur les prélèvements, AMORCE propose :

- La création d'une redevance ciblant les produits d'usages générant des pollutions émergentes dont font partie les PFAS. Aux vues des impacts qu'ils génèrent sur la santé et le cycle de l'eau (potable, usée et milieux aquatiques), il est indispensable de responsabiliser les metteurs sur le marché en visant ces micropolluants.
- La multiplication par 5 des redevances de pollutions industrielles et agricoles pour couvrir les besoins de traitements et en parallèle inciter aux changements de comportements.

Ces nouveaux financement devraient permettre de générer 500M€/an, car à défaut de mieux réguler la mise sur le marché des pesticides et des produits contenant des PFAS, l'État doit s'appuyer sur une taxation réellement dissuasive qui ne soit juste un droit à polluer.



3. Solutions techniques avancées, les réponses innovantes aux nouvelles exigences

L'ubiquité des PFAS, la faible adsorption de certains métabolites de pesticides dans les sols, ainsi que la résistance à la dégradation de ces deux familles de substances augmentent considérablement le risque de contamination des ressources en eau.

Pour faire face à ces défis, des traitements avancés sont nécessaires, souvent adaptés en fonction de la nature de la pollution et des objectifs de traitement.

En eau potable, 2 types de traitements avancés sont principalement utilisés, autres que les solutions plus classiques comme la photolyse et chloration, pour le traitement de ces polluants émergents :

- Le piégeage (Filtration par osmose inverse basse pression ou nanofiltration, adsorption sur charbon actif)
- L'oxydation (ozonation).

Cependant, l'ozonation reste peu usitée car elle produit des sous-produits qui peuvent d'avérer toxiques comme des bromates, ça mise en œuvre dépendra donc des conditions initiales de l'eau brute.

Chacune de ces technologies peut être utilisées pour gérer aussi bien les PFAS, que les pesticides et leurs métabolites. La seule contrainte, et pas des moindres, vient de la multitude de molécules qui ont des seuils de traitabilités pouvant varier d'une substance à l'autre. Ce seuil dépendra nécessairement de la technologie employée et de « l'affinité » des molécules à traiter avec ces dernières.

Pour les PFAS, la stabilité des liaisons carbone-fluor confère à ces molécules une grande résistance aux mécanismes de biodégradation dans l'environnement. En outre, ils résistent à la plupart des méthodes traitements classiques comme l'oxydation directe ou l'UV.

Les carbons actifs offrent une bonne élimination des molécules à chaînes longues, mais nécessitent des ajustements sur les substances de plus petite taille, ainsi qu'un renouvellement fréquent des médias d'adsorption. La filtration membranaire et l'osmose inverse basse pression sont efficaces, mais impliquent une gestion des concentrats.

Concrètement, un traitement efficace des PFAS nécessitera plusieurs étapes de traitement ou combinaisons de procédés.

L'ANSES a réalisé une [bibliographie](#) sur l'efficacité de traitement de potabilisation pour ces substances. Aucune solution idéale ne se dégage parmi celles mentionnées. La chloration serait sans effet et l'ozonation serait inefficace sur les certaines perfluorés comme le PFAA et induit la création de sous-produits.

Pour les métabolites de pesticides dans les EDCH, les technologies de traitement avancées sont similaires à celles utilisées pour les PFAS.

De manière générale, les métabolites des pesticides sont plus solubles dans l'eau, plus polaires et donc moins facilement éliminables que les molécules parentes par les traitements classiques utilisés en production d'EDCH. Les procédés de traitement utilisés pour éliminer les métabolites sont principalement l'adsorption sur charbon actif et l'ozonation et plus rarement la nanofiltration. La coagulation-flocculation décantation (clarification) peut avoir une certaine efficacité pour quelques métabolites mais ne figure pas parmi les solutions recommandées.

3.1. Adsorption sur charbon actif

L'utilisation des carbons actifs pour le traitement d'affinage des EDCH est une méthode éprouvée et largement répandue pour éliminer divers contaminants organiques, y compris les métabolites de pesticides. Bien que l'efficacité de l'adsorption sur ces médias soit généralement variable en fonction des conditions d'utilisation, des substances à retirer des eaux et des caractéristiques mêmes des carbons employés, cette technique est reconnue pour cibler et éliminer efficacement un ensemble de molécules. En revanche, ils ont la particularité

d'être dimensionnés en fonction de la gamme de concentrations des polluants. Donc leur efficacité et leur saturation dépendra nécessairement de ces quantités.

Plus la concentration initiale en polluant à traiter dans les eaux brutes est élevée, plus il sera compliqué d'abattre la molécule, limitant parfois de passer sous les normes de qualité requises dans les EDCH, même à efficacité optimale. (Kiefer et al, 2020 ; Domergue et al, 2022 ; Taylor et al, 2022).

De plus, à mesure que les connaissances évoluent, il peut s'avérer plus compliqué de traiter certaines molécules, demandant une adaptation de procédé afin d'assurer une efficacité de traitement. Par exemple, les métabolites du chlorothalonil (R471811 et R417888) sont des molécules particulièrement difficiles à traiter, en comparaison avec d'autres métabolites comme le ESA métolachlore.

Une problématique similaire existe pour les PFAS, l'efficacité d'adsorption sur charbons actifs dépendra des caractéristiques des molécules à traiter. La littérature scientifique indique que ce mécanisme est très efficace sur les molécules à chaîne longue comme le PFOS. En revanche, le procédé présente une efficacité plus limitée sur les PFAS à courtes chaînes tels que le PFBA et sur les acides carboxyliques tels que le PFOA.

3.1.1. Principe et fonctionnement :

Le charbon actif est obtenu à partir de matières premières riches en carbone, telles que le bois, les coques de noix de coco, ou le charbon. Ces matériaux subissent un processus de pyrolyse, soit une décomposition thermique en l'absence d'oxygène, suivie d'une activation physique ou chimique pour développer une structure poreuse et une surface spécifique importante. Le charbon actif peut être produit sous différentes formes, notamment en poudre (CAP) ou en granulés (CAG), en fonction des applications et des exigences spécifiques.

Appliqué à la production d'eau potable, le procédé d'adsorption sur charbon actif repose sur la capacité du charbon actif à attirer et à retenir les molécules de contaminants présents dans l'eau, grâce à ses pores et sa surface spécifique élevée. Deux formes de charbons actifs peuvent être mises en œuvre :

- Le charbon actif en poudre : en tête de filière, pour traiter les pollutions accidentielles ou saisonnières de la ressource en eau. Il doit être séparé de l'eau après avoir adsorbé les polluants, ce qui implique un usage unique et engendre un coût de fonctionnement important car il ne peut pas être régénéré.
- Le charbon actif en grains : en remplacement d'un filtre à sable ou en 2e étage de filtration, pour l'affinage de la qualité de l'eau. Utilisé aussi dans le cas de pollution chronique.

Pour retenir et fixer les pesticides, en fin de chaîne de traitement, les CAG sont le plus généralement utilisés. Pour l'élimination des micropolluants organiques, il est possible de recirculer en continu le CAP afin d'optimiser son utilisation, ou de coupler adsorption sur CAP et filtration sur membrane.

Au niveau de l'affinage, certains CAG macroporeux, dits « biologiques », permettent la « sédentarisation » de bactéries et offrent ainsi le double avantage d'assurer l'adsorption de la matière organique et de favoriser son élimination biologique.

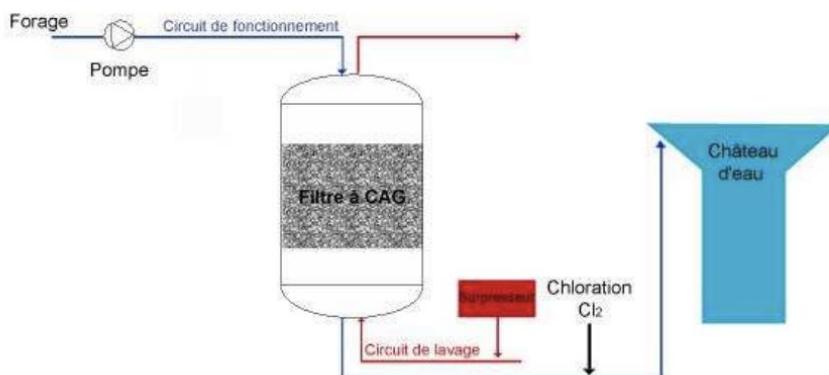


Figure 1 Schéma simplifié d'un traitement par charbon actif pour la production d'une EDCH



Avant d'entrer en contact avec le charbon actif, l'eau brute, selon son origine, peut subir un prétraitement pour éliminer les particules en suspension, certaines matières organiques et inorganiques, ainsi que les microorganismes. Ce prétraitement peut inclure la coagulation-floculation, la sédimentation, la filtration et la désinfection, afin d'améliorer l'efficacité de l'adsorption et de prolonger la durée de vie du charbon actif. Cette étape est cruciale pour éviter la mise en compétition entre substances adsorbables sur le média.

L'eau prétraitée est mise en contact avec le charbon actif dans un réacteur ou un filtre spécifique. Les contaminants organiques présents dans l'eau, tels que les métabolites de pesticides et les PFAS, sont adsorbés sur la surface poreuse du charbon actif en raison des forces d'attraction intermoléculaires. L'efficacité de l'adsorption dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature et la concentration des contaminants, la surface spécifique et la porosité du charbon actif, le temps de contact entre l'eau et le charbon, ainsi que les conditions opératoires (pH, température, etc.).

Au fil du temps, le charbon actif sature et perd sa capacité d'adsorption. Pour restaurer ses propriétés adsorbantes, il est nécessaire de le régénérer périodiquement. La régénération du charbon actif peut être réalisée par différentes méthodes, telles que la thermolyse (chauffage à haute température dans un environnement contrôlé), l'oxydation chimique (traitement avec des agents oxydants) ou la désorption à la vapeur d'eau. La méthode de régénération choisie dépend du type de charbon actif et des contaminants à éliminer.

En raison de la solubilité des pesticides, les procédés classiques de traitement de l'eau (clarification, filtration sur sable, désinfection) sont inefficaces pour leur élimination. Pour les métabolites de pesticides et les PFAS, il est important de souligner que les charbons doivent être renouvelé à intervalles réguliers (selon les molécules visées, le type de charbon, le flux à traiter).

Dans l'ensemble, le procédé d'adsorption sur charbon actif est une méthode efficace pour éliminer divers contaminants organiques, y compris les métabolites de pesticides et les PFAS, des eaux destinées à la consommation humaine. Toutefois, son efficacité dépend de nombreux facteurs et doit être optimisée en fonction des caractéristiques de l'eau à traiter et des objectifs de qualité à atteindre.

Informations complémentaires :

- **Le taux de traitement appliqu**é sur le charbon (références de fonctionnement entre 5 mg/L jusqu'à 20 mg/L de charbon selon la concentration de pollution présente dans l'eau à traiter)
- Le temps de contact entre l'eau à traiter et le charbon : **les temps de contact sont généralement compris entre 10 et 30 minutes** en fonction des filtres utilisés.
- Le coût du charbon : la fourchette de prix est large, et peut varier entre 1000 et 4000 euros la tonne (la densité varie habituellement entre 0,3 et 0,5 t/m³), mais l'actualité liée à la présence de métabolites impose de prendre en compte le critère qualité/efficacité.

3.1.2. Facteurs influençant l'efficacité

Une filière de charbon actif bien dimensionnée offre un rendement d'élimination des substances ciblées, telles que les PFAS et les métabolites de pesticides, compris entre 90 et 99 %. Bien que l'efficacité des charbons actifs puisse varier d'un métabolite à l'autre, ils ont globalement démontré une bonne capacité à adsorber ces molécules.

Toutefois, l'efficacité des charbons actifs dépend de plusieurs facteurs :

- **Nature et concentration des contaminants** : Les caractéristiques des contaminants influencent l'adsorption sur le charbon actif. Certains métabolites et PFAS sont plus facilement adsorbés que d'autres.
- **Type de charbon actif utilisé** : Chaque type présente des caractéristiques particulières en termes de surface spécifique, taille des pores et capacité d'adsorption, ce qui peut influencer leur efficacité dans l'élimination des métabolites de pesticides et des PFAS. Le matériau d'origine du charbon influence également les performances, celui issu de la noix de coco semble moins efficace.

- **Temps de contact entre l'eau et le charbon** : Un temps de contact suffisant est essentiel pour assurer une adsorption optimale des contaminants.
- **Conditions opératoires** (pH, température, etc.) : Les conditions opératoires peuvent affecter l'efficacité de l'adsorption sur le charbon actif.

La régénération et l'élimination des charbons actifs sont des aspects importants à prendre en compte. Les charbons actifs ont une capacité d'adsorption limitée et doivent être régénérés ou remplacés périodiquement. La régénération peut être réalisée par différentes méthodes, telles que la thermolyse, l'oxydation chimique ou la désorption à la vapeur d'eau. Cependant, la régénération peut entraîner une perte de capacité d'adsorption et une altération des propriétés du charbon actif. De plus, l'élimination des charbons actifs usagés peut poser des problèmes environnementaux et de santé, en particulier s'ils contiennent des contaminants dangereux.

Les retours d'expérience montrent que les charbons actifs peuvent être une solution efficace pour éliminer les métabolites de pesticides et les PFAS dans la production d'EDCH, à condition de bien choisir le type de charbon actif, d'optimiser les conditions opératoires et de prendre en compte les aspects liés à la régénération et à l'élimination des charbons usagés.

3.1.3. Avantages et inconvénients

Le CAG offre généralement un bon rapport coût/efficacité. Cependant, son rendement pour l'élimination des pesticides est variable. La saturation du charbon actif est rapide, mais cette technologie est éprouvée dans le traitement des pesticides et des micropolluants organiques.

La performance du CAG décroît lorsque le Carbone Organique Total augmente. En revanche, il croît avec des filtres en série. Le CAP, quant à lui, est plus souple d'utilisation. Il peut être utilisé pour le traitement ponctuel suite à une période de crise de pollution, en première phase d'adsorption en amont d'un passage sur un filtre à CAG pour réduire la vitesse de saturation du filtre, ou en usage exclusif couplé avec une filtration sur membrane pour permettre son élimination. La performance du CAP est généralement plus élevée que celle du CAG pour l'élimination des métabolites de pesticides et des PFAS.

Toutefois, l'évolution des connaissances et des réglementations à faible capacité du charbon actif à adsorber certains métabolites nécessite une régénération fréquente du charbon actif, entraînant des coûts d'exploitation relativement élevés.

Les coûts associés à l'utilisation des charbons actifs pour la production d'EDCH incluent les coûts d'achat, d'installation, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts de régénération ou de remplacement du charbon actif. Ces coûts peuvent varier considérablement en fonction du type de charbon actif utilisé, de la taille de l'installation et des conditions opératoires.

L'adsorption sur charbon actif présente plusieurs avantages pour le traitement des PFAS, tels que l'absorption d'autres micropolluants (résidus pharmaceutiques, pesticides, solvants, etc.), l'évolutivité de la technologie, la disponibilité du savoir-faire technique de base pour les opérateurs de traitement des eaux usées, et la possibilité d'avoir un média solide. De plus, le dosage de CAP peut être intégré au processus de traitement existant, en fonction de la configuration actuelle du processus.

Cependant, il existe également des inconvénients à l'utilisation de l'adsorption sur charbon actif pour le traitement des PFAS. Le charbon actif a des caractéristiques différentes, et il est important de choisir un charbon adapté à l'application prévue. L'efficacité du traitement diminue au fil du temps, et la saturation est rapide pour les PFAS à chaîne courte comme le PFBA. La capacité d'adsorption moyenne pour les PFAS est plus faible que pour la plupart des résidus pharmaceutiques, ce qui implique un coût opérationnel plus élevé pour le remplacement du matériel de filtre. Des traitements biologiques étendus et une étape efficace d'élimination des particules avant le processus d'adsorption sont nécessaires pour un fonctionnement stable. Enfin, il n'y a pas d'indication facile de saturation, et des analyses périodiques des substances cibles sont requises.



3.1.4. Retours d'expériences

Retour d'expérience : Rumilly Terre de Savoie, contamination aux PFAS

Rumilly Terre de Savoie fait partie des zones les plus touchées par la pollution aux PFAS. En cause, son fort tissu industriel, actuel et historique, qui a contaminé durablement le territoire.

Face à cette problématique de grande ampleur, l'ensemble des captages d'eau potable dans lesquels les teneurs en PFAS étaient supérieures à la valeur réglementaire ont été déconnectés. Il s'agissait de captages publics et privés. Actuellement, la solution mise en place est une interconnexion avec le territoire du Grand Annecy. Des mesures de plus long terme sont à l'étude par la collectivité et les services de l'État. Cependant, malgré la pollution, les analyses de novembre 2022 confirment que l'eau desservie à Rumilly répond aux exigences sanitaires. L'ARS ne recommande donc pas de restriction de la consommation de l'eau potable.

Mais pour éviter toute accumulation, et donc non-conformité future par les PFAS, la collectivité a fait le choix de mettre en place une file de traitement au Charbon actif sur son usine de potabilisation.

Les premiers résultats, avec un recul de 6 mois, montrent un retour sous le seuil de 0,1 µg/L pour la somme des 20 PFAS, attendu par la DAEP.

En parallèle, un programme d'analyses et de surveillance a été demandé par l'État pour les sites potentiellement à l'origine de la pollution. De nombreuses études sont en cours sur les sites de plusieurs acteurs économiques, notamment dans leurs rejets aqueux.

Les résultats pour l'air et pour les boues sorties de la station d'épuration ne montrent pas de teneurs significatives en PFAS.

Des études historiques et analyses des milieux sont en cours, concernant une entreprise de fabrication d'ustensiles de cuisine (emprises actuelles et anciens dépôts de boues) et sur un ancien site de fabrication de skis. Un diagnostic de sols a également été réalisé sur une ancienne tannerie du territoire, qui n'a pas montré de contamination significative aux PFAS.

Retour d'expérience : Atlantic'eau, le cas du ESA métolachlore et du R471811

Face aux défis croissants posés par les métabolites de pesticides, Atlantic'eau investit dans la rénovation de ses usines de production d'eau potable, afin de répondre aux problématiques. En sortie d'une des usines de production d'eau potable, le R471811 (avant déclassement du métabolite) dépasse régulièrement la limite de qualité réglementaire de 0,1 µg/L. En réponse, Atlantic'eau a fait une demande de dérogation pour remettre en conformité l'eau distribuée sur son territoire.

Afin d'améliorer durablement la qualité de l'eau distribuée, les deux filières actuelles vont être améliorées avec un traitement par adsorption sur charbon actif. Opérationnelles depuis 2023 et les nouvelles unités doivent théoriquement satisfaire les exigences réglementaires et délivrer une qualité d'eau optimale.

D'un montant global de 6 500 000 € HT (maîtrise d'œuvre et études préliminaires comprises), l'investissement est porté par Atlantic'eau, avec un soutien financier de France Relance à hauteur de 840 700 €.

Les travaux concernent :

- La création de la nouvelle filière, incluant le traitement des pesticides par charbon actif micro-grain,
- L'intégration d'un stockage de 2000 m³ et d'un pompage supplémentaire pour renforcer l'alimentation du sud-ouest du territoire,
- La sécurisation électrique des installations avec la mise en place d'un groupe électrogène,
- Le renforcement de la sûreté du site avec prise en compte de la cybersécurité.

Toutefois, le classement « pertinent » du métabolite R471811 a obligé la collectivité à prendre en compte cette nouvelle contrainte dans les calculs de dimensionnement du filtre à charbon actif courant 2023. Et depuis 2024 avec le déclassement de la molécule, Atlantic'eau a fait le choix de ne pas modifier le process, afin de garder un haut niveau de performance dans ses usines de potabilisation.

3.2. Filtration par osmose inverse basse pression

L'Osmose Inverse Basse Pression (OIBP) est une technique de filtration membranaire utilisée pour la potabilisation de l'eau. Intervenant en tant que traitement d'affinage, elle permet d'abattre fortement la matière organique dissoute et les micropolluants, dont font partie les perfluorés et les métabolites de pesticides. Cette méthode permet également d'adoucir les eaux dures.

3.2.1. Principe de fonctionnement

Le procédé d'OIBP est une technique de filtration membranaire qui utilise des membranes semi-perméables, minérales ou organiques, pour séparer les substances indésirables de l'eau. Cette méthode se situe entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse en termes de taille des pores des membranes. Les membranes d'OIBP retiennent les solides de taille supérieure à celle du nanomètre, les bactéries, les virus, ainsi que les ions multivalents responsables de la dureté de l'eau, tels que le calcium et le magnésium.

Pendant le processus d'OIBP, une pression est appliquée à l'eau, ce qui la force à traverser la membrane semi-perméable et la sépare donc en deux courants :

- Le perméat, qui est l'eau épurée passant à travers la membrane et produisant l'eau potable.
- Le concentrat, qui contient l'ensemble des sels et matières polluantes retenus par la membrane et qui doit être éliminé.

Le rejet du concentrat s'effectue en continu, simultanément à la production d'eau potable. Il est important de noter les déchets concentrés produits devront être gérés de manière appropriée afin d'éviter tout impact environnemental négatif.

3.2.2. Description du procédé

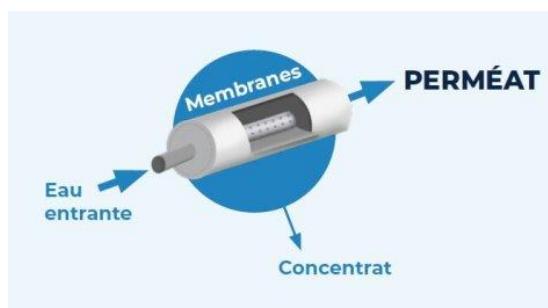


Figure 2 : Schéma synthétique de l'osmose inverse (source : SEDIF)

L'OIBP repose sur le passage de l'eau à travers une unité de composée de tubes contenant des modules de filtration membranaire en série. Ces membranes, dotées de pores très fins (environ 0,0001 micron), agissent comme des filtres physiques. Chaque module se compose de plusieurs poches superposées et roulées en spirale autour d'un collecteur central perforé, formant ainsi des modules de filtration spiralés.

Ces modules sont disposés en série dans des tubes rigides appelés carters, par emboîtement des collecteurs centraux. Les tubes de pression peuvent recevoir jusqu'à huit membranes. Pour permettre le passage de l'eau brute dans les modules successifs, l'alimentation est réalisée sous pression d'une extrémité à l'autre du carter. La configuration compacte des modules réduit les pertes de charges, permettant ainsi de limiter l'énergie nécessaire à mettre en œuvre.

Les modules de filtration sont conçus avec plusieurs poches superposées et roulées en spirale. Lorsque l'eau à traiter traverse ces membranes, celles-ci agissent comme des tamis, laissant passer l'eau purifiée tout en



retenant les composés indésirables en fonction de leurs propriétés physico-chimiques, telles que la taille et la charge électrique. L'eau filtrée circule ensuite entre les poches successives pour atteindre le collecteur central du module.

Chaque module traite une fraction de l'eau, tandis que l'eau non traitée passe au module suivant pour un traitement supplémentaire. Ce processus fonctionne selon un mode On-Off et peut être appliqué sur tout ou partie du débit d'eau, en fonction des besoins et des exigences de qualité de l'eau.

Le perméat est drainé par les collecteurs intermédiaires vers les collecteurs centraux et le concentrat est récupéré à l'extrémité opposée de l'alimentation en eau brute. En fonction des capacités de production attendues, les carters sont agencés en série et/ou en parallèle.

Il existe plusieurs types de membranes, avec des rendements différents en fonction de la taille des molécules. Les membranes les moins permissives vont retenir à la fois les grosses et les très petites molécules, tandis que les plus permissives ne retiendront que les grosses. Plus la membrane est efficace, plus l'eau traitée sera déminéralisée. Dans certains cas, pour éliminer les éléments les plus petits, il est nécessaire de reminéraliser l'eau traitée après son passage sur une membrane.

Pour éviter la déminéralisation, des mitigeages sont réalisés et seule une partie de l'eau à traiter passe par la membrane d'osmose inverse. Elle est ensuite mélangée à des eaux brutes qui ne passent pas dans la membrane.

Dans une filière de production d'eau potable, l'Osmose Inverse Basse Pression comprend les étapes suivantes :

- By-pass et mitigeage selon le besoin
- Prétraitements
- Une unité de filtration membranaire par nanofiltration (Osmose Inverse Basse Pression)
- Bâche de mélange
- Remise à l'équilibre calco-carbonique
- Distribution des eaux traitées
- Désinfection de l'eau
- Traitement et/ou Rejet (sous réserve d'autorisation) des concentrats
- Lavage des membranes

Quelle différence entre l'osmose inverse et l'OIBP ?

En osmose inverse haute pression, l'eau à traiter est soumise à des pressions entre 15 et 80 bars, ce qui les rend efficaces pour filtrer les eaux très chargées en impuretés, comme l'eau de mer ou les eaux usées industrielles.

L'osmose inverse basse pression, en revanche, utilise des membranes opérant entre 5 et 10 bars, ce qui les rend adaptées aux contextes où la qualité de l'eau initiale est relativement bonne. Elles sont moins coûteuses à entretenir et à faire fonctionner grâce à leur faible consommation d'énergie, mais peuvent présenter des taux d'eaux usées plus élevés et être moins efficaces pour éliminer certaines impuretés.

3.2.3. Avantages et inconvénients

Jugée hautement efficace, l'OIBP démontre généralement des performances d'abattement supérieures à 95% sur un large éventail de métabolites de pesticides et de PFAS. Cependant, comme toute technologie innovante, elle présente des avantages et des inconvénients à sa mise en œuvre.



Bien que le process d'OIBP fonctionne à des pressions moindres que l'osmose inverse classique, une mise sous-pression de plusieurs bars doit malgré tout être appliquée à l'eau à traiter. Cette nécessité entraînera des consommations énergétiques supérieures vis-à-vis d'autres technologies avancées, et par extension des coûts de fonctionnement supplémentaires. Néanmoins, l'OIBP reste une technologie fiable, notamment son large spectre de substances « éliminées » fait qu'elle permet de garantir une EDCH de qualité et répondant aux exigences réglementaires. Renforçant ainsi son adaptabilité. Les membranes d'osmose inverse basse pression consomment moins d'énergie, coûtent moins cher à entretenir et sont moins difficiles à utiliser que les membranes d'osmose inverse haute pression.

Cependant, l'OIBP présente certains inconvénients. Tout d'abord, avec l'état actuel des connaissances sur les métabolites de pesticides et PFAS, la technologie pourrait avoir une capacité réduite à retenir certaines substances, particulièrement dans des eaux très contaminées. De plus, l'efficacité des membranes à basse pression peut être influencée par des facteurs tels que la présence (ou non) d'une préfiltration, la température et le vieillissement des membranes, nécessitant des ajustements et possiblement entraînant des coûts supplémentaires en prétraitement.

La gestion efficace des concentrats dépend fortement des contaminants présents et de la capacité d'acceptation de l'environnement récepteur. Cependant, dans le cadre de micropolluants comme les PFAS et les métabolites de pesticides, un rejet au milieu naturel est inenvisageable. La solution pour gérer efficacement les concentrats semble alors, dans la mesure du possible, une redirection vers des stations d'épuration. Bien que cela représente entre 10 et 15% du volume traité, il reste crucial de veiller à ce qu'ils soient traités ou éliminés de manière à ne pas nuire à l'environnement. C'est pourquoi tout projet d'OIBP, voire de filtration membranaire, doit se faire en fonction de la possibilité de gestion desdits concentrats, tant dans les coûts de fonctionnements supplémentaire que sur le besoin d'infrastructures. D'où l'importance de souligner que le choix de cette technologie doit se faire en concertation et en fonction du contexte local.

3.2.4. Retour d'expérience

Retours d'expérience : Syndicat D'Eau potable d'Île de France, comparatifs et essais de traibilité

Le SEDIF (Syndicat des eaux d'Île-de-France) a un projet d'installation d'une technique de filtration membranaire (osmose inverse basse pression/nanofiltration) sur ses usines de potabilisation (UEP). Le principal objectif de la structure étant de faire face aux évolutions réglementaires face aux exigences sanitaires, en particulier sur les métabolites de pesticides.

Au travers ce projet, c'est une volonté d'anticiper les actions sur les nouvelles molécules pertinentes et d'évaluer l'efficacité de traitements sur celles-ci. Le SEDIF a donc porté son choix sur 2 métabolites : le DPC (DesPhényl Chloridazone) métabolite « pertinent par défaut » du chloridazone et le R471811, nouvellement classé « non pertinent » (2024) mais « pertinent par défaut » au moment des essais.

La première étape est l'étude de l'efficacité des traitements actuellement en place dans les UEP du SEDIF :

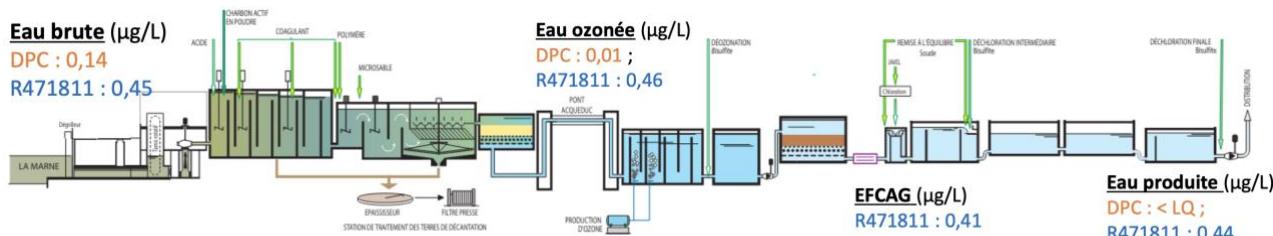


Figure 3 : Schéma de l'usine de potabilisation de Neuilly-sur-Marne et résultats de traitement du DPC et R471811

La plupart des UEP du SEDIF sont équipées d'une ozonation et d'une filtration sur charbon actif en grain qui permet de gérer la majorité des micropolluants organiques (DPC sous la limite de quantification (LQ) dans les eaux produites). Toutefois, pour des substances tels que le R471811, les PFAS ou les résidus de médicaments, les traitements montrent leurs limites car les retenus de molécules sont faibles.



Face à ces résultats, le pôle recherche du SEDIF a réalisé des essais pilotes sur plusieurs technologies et combinaisons de technologies, afin de déterminer la ou lesquelles semblent les plus efficaces. Ces tests de traçabilité ont été réalisé sur des charbons actifs (Poudre et Grain), des membranes de nanofiltration et une unité d'OIBP.

	Taux d'abattement	
	Nanofiltration	OIBP
DPC	<30%	>81%
R471811	99%	99%

Figure 4 : Résultats des essais pilotes membranaires du SEDIF

Les essais sur les charbons montrent des résultats équivalents à ceux déjà trouvé dans les process actuellement en place, tandis que les pilotes membranaires semblent nettement plus efficaces, en particulier pour l'OIBP. Ces résultats confortent le SEDIF dans l'idée que les métabolites sont un réel enjeu pour les filières de production d'eaux potables, montrant également que la complémentarité des traitements est nécessaire pour la prise en compte de l'ensemble des pollutions émergentes.

C'est pourquoi, face à la problématique grandissante des micropolluants, le SEDIF opte pour une stratégie multi-barrière.

Avec des ressources principalement superficielles, donc sujettes à de fortes variabilités de qualité, il apparaît nécessaire d'avoir un pilotage efficace de toute la chaîne de traitements. C'est pourquoi le SEDIF a mis en place :

- Un suivi renforcé des paramètres micropolluants qui s'appuie sur des analyses microbiologiques et physico-chimiques mais aussi des empreintes chimiques (détectio de la présence de molécules sans quantification) pour une plus grande exhaustivité et des bioessais.
- Un concept de traitement multi-barrière, pour une grande efficacité et une sécurité renforcée; A terme ces traitements devraient être renforcés par l'installation de membrane « osmose inverse à basse pression » sur les principales usines de production.

C'est cette dernière notion qui conforte le syndicat dans son projet « Eau Pure » d'installation d'OIBP sur ses 3 principales usines de production d'eau potable. Pour le SEDIF, il s'agit là d'appliquer les principes de précaution et de prévention, en anticipation de la réglementation en retirant un maximum de micropolluants.

Cependant, ce projet nécessitera une augmentation de la consommation d'énergie de l'ordre 100 GWh/an, influençant directement le prix de l'eau, qui, en prenant en compte le coût total du projet, estimé en 2022 à 870 millions d'euros HT, reviendra à une hausse 30 à 40 cts par m³ pour l'usager (soit 3 à 4€ en plus par mois).

3.3. Autre procédé membranaire : la nanofiltration

3.3.1. Retour sur la nanofiltration

Les études bibliographiques font état que parmi les procédés de filtration existants (hors OIBP), seul la nanofiltration présente des rendements intéressants dans l'élimination des pollutions émergentes. L'ultrafiltration servant généralement d'étape de pré-traitement.

Comme l'OIBP présentée dans la partie précédente, la nanofiltration est une technique de filtration membranaire avancée, qui laisse passer l'eau mais en retentant les molécules et ions dissous.

Entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse, la nanofiltration utilise des membranes moins fines et nécessite une pression d'alimentation plus faible comparée à celle de l'osmose inverse. Elle peut donc présenter des taux d'enracinement plus faible.

Les applications courantes de la nanofiltration comprennent l'adoucissement, l'élimination des métaux lourds des effluents pour la réutilisation de l'eau, et la réduction de la teneur en ions sodium. Une utilisation classique montre des résultats assez éclatés allant de 50 % d'élimination des ions NaCl, à 90 % pour les ions CaSO₄.



Comme l'osmose inverse basse pression, les procédés membranaires avancés comme la nanofiltration présentent l'avantage de retenir une large gamme de micropolluants et ont des rendements plus élevés à large spectre, quel que soit le type de PFAS considéré, de l'ordre de 70 à 95%.

Cependant, ces procédés consomment de l'énergie et sont plus coûteux à l'investissement et en charges d'exploitation. De plus, cette technologie produit des concentrats très chargés qu'il faudra nécessairement traiter.

3.3.2. Une performance qui dépend des conditions initiales

Parmi les différentes technologies de traitement, la nanofiltration est parmi les plus adaptées pour une élimination des pesticides des EDCH. Néanmoins, des études mettent en perspective ces performances vis-à-vis des types de membrane utilisés mais également des caractéristiques physico-chimiques des molécules à abattre dont leur solubilité dans l'eau. Plus cette dernière sera faible, plus les taux d'abattement seront élevés.

La rétention d'une molécule donnée correspond à la fraction des pores dont le diamètre est plus petit que la molécule à éliminer

Il existe deux types de membranes pour la nanofiltration :

- Les membranes spirales, large surface de contact mais plus sensibles aux pollutions.
- Les membranes tubulaires, qui sont les plus utilisées en raison de leur coût et de leur efficacité.

L'installation d'une préfiltration présente plusieurs avantages, tels qu'une durée de vie plus longue, une augmentation de la production de l'installation et un entretien simplifié.

Parmi les autres facteurs influençant les performances des membranes, il faut noter :

- **La matière organique**, présente dans l'eau brute elle mène à une augmentation de la vitesse d'enrassement des membranes de nanofiltration
- **Le pH**, toute variation est susceptible de la charge en surface de la membrane. C'est-à-dire, une membrane chargée positivement attire les PFAS anioniques, réduisant ainsi le taux de rejet, tandis qu'à l'inverse, si chargée négativement peut améliorer l'efficacité de séparation des PFAS. De plus, la manipulation du pH peut ajuster la taille des pores de la membrane, influençant l'élimination des PFAS.
- **Structure moléculaire** des molécules à éliminer (taille, masse molaire, structure).
- **L'utilisation de membranes organiques**, elles ont l'avantage d'être plus robustes, plus faciles à exploiter et moins chères que les inorganiques. La couche active de séparation de la membrane est un paramètre clé pour déterminer la performance des membranes pour l'élimination des PFAS. De plus, avec des surfaces hydrophiles et chargées négativement, ainsi qu'un seuil de coupure moléculaire bas, la rétention des substances se verra affectée.
- **La concentration initiale en PFAS**, influence à la fois le flux de perméat et l'efficacité de l'élimination. Plusieurs études ont examiné l'efficacité de l'élimination des PFAS en traitant une concentration élevée d'alimentation. Dans ces cas, cela peut entraîner la formation de micelles ou des agrégats de molécules, diminuant les performances de traitement.

La caractérisation du poids moléculaire est cruciale pour évaluer si une membrane est adaptée à la réduction des PFAS d'une eau contaminée.

Plus les membranes seront denses, plus le seuil de coupure sera faible et au mieux les PFAS pourront être retenus. Des facteurs tels que la charge électrique et les propriétés hydrophobes/hydrophiles affecteraient également l'élimination.

Si essentiellement tournées autour des PFAS, les conditions opératoires optimales s'appliqueront également pour les métabolites de pesticides.

Nota : Le couplage CAP / membranes.



En traitement des eaux, il est possible de coupler l'usage de membranes de filtration avec l'emploi du Charbon Actif en Poudre. Ceci permet d'utiliser le charbon à ses pleines performances et de bénéficier des avantages inhérents aux membranes. Une solution qui peut être particulièrement efficace pour traiter les métabolites de pesticides et qui demande à être testée pour les PFAS.

3.4. Autres types de traitement

3.4.1. Coagulation-Flocculation-Décantation

Dans les procédés de production d'eau potable et selon les besoins initiaux en traitement, il arrive qu'un traitement physico-chimique, comme la coagulation-flocculation, soit nécessaire. Essentiellement pour traiter les matières colloïdales présentent dans les eaux, des études ont été menées afin de déterminer les taux d'abattement des métabolites de pesticides. Il apparaît que les caractéristiques moléculaires de ces substances ne permettent pas de montrer d'effet significatifs sur l'élimination par coagulation-flocculation.

À titre d'exemple, selon l'étude Bouillot et coll. (1991), le taux moyen d'élimination de l'atrazine est de 12%. En aucun cas, il ne peut s'agir d'un traitement approprié aux pesticides afin de descendre sous la limite de 0,03 µg/L.

Un constat similaire peut facilement être fait pour l'élimination des PFAS dans l'eau. Toutefois, bien que peu adaptée, il semble qu'un transfert vers les boues soit possible.

3.4.2. Procédés d'oxydation

L'oxydation par des entités chlorées (chlore ou peroxyde de chlore) n'a qu'un effet limité pour les taux de traitement en usine de potabilisation, avec une réduction moyenne de 4% pour l'atrazine.

L'ozonation, notamment lorsqu'elle est couplée au peroxyde d'hydrogène, est une méthode efficace pour éliminer les pesticides mais son efficacité dépendra des paramètres opératoires (taux d'ozone appliqué, ratio $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$, temps de contact, ...) et des caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute (pH, teneur en matières organiques naturelles, température, alcalinité). Ces conditions exercent une influence directe sur la consommation et la décomposition de l'ozone.

À titre opératoire, les doses classiques d'ozone utilisées en usine de potabilisation permettent d'éliminer 30 à 70% des triazines, taux qui peut atteindre 90% en présence de peroxyde d'hydrogène. Pour d'autres molécules comme le métolachlore et métabolites, les études montrent une efficacité de l'ordre de 60%.

D'autres procédés d'oxydation, tels que le réactif de Fenton ou la photocatalyse, sont aussi utilisés pour dégrader rapidement les pesticides. Cependant, leur application à grande échelle est limitée par des inconvénients comme une consommation énergétique élevée et la nécessité d'une eau très peu turbide.

En revanche, pour les PFAS, leur résistance aux traitements classiques est aussi vraie pour l'oxydation directe. Toutefois pour les variantes avancées (oxydation électrochimique), ce sont des technologies qui sont toujours en phase d'essais laboratoire, et les résultats ne semblent pas encore assez intéressants pour un déploiement à plus grande échelle.

Il apparaît nécessaire de rappeler que l'utilisation de procédés d'oxydation en eau potable présente quelques risques non négligeables et à prendre en compte car ils posent des problèmes récurrents de formation d'éléments indésirables dans l'eau comme les perchlorates, bromates.

3.5. Élimination des sous-produits de traitement

Les procédés présentés dans ce document étant essentiellement des procédés de piégeage, l'élimination des PFAS et des métabolites de pesticides n'est pas réalisée. Le changement de média fait qu'il y aura nécessairement besoin d'un retraitement sur le nouvel élément contaminé.



Il est donc crucial d'intégrer la gestion des déchets issus des unités de dépollution. Après traitement, les déchets sont traités par incinération ou envoyés en centre de stockage, ce qui risque d'entraîner une remobilisation des PFAS sous forme gazeuse ou aqueuse.

La gestion des sous-produits (concentrats, charbons actifs non recyclés, etc.) de traitement des métabolites de pesticides et des PFAS consiste généralement soit à un traitement thermique en incinérateur, soit à un enfouissement dans un centre de stockage de déchets équipés de dispositifs de suivi et de traitement des rejets aqueux et atmosphériques.

Dans le cas du traitement au charbon actif contaminé, des analyses complémentaires sont nécessaires afin de déterminer s'il est possible de recycler le média en vue d'une possible réutilisation. Pour le cas des concentrats des traitements membranaires, il est impératif de prévoir une destination appropriée pour les concentrats, soit directement dans une STEU, soit dans une unité spécifique sur charbon actif. Répétant ainsi le processus. Il est obligatoire de ne pas rejeter les résidus liquides dans les milieux car, comme rappelé tout au long de ce document, les PFAS et métabolites de pesticides ne seront pas épurés naturellement.

Également, tout résidu solide (type boues) de traitement mais pas associé directement à la gestion des pollutions émergentes devrait faire l'objet d'un suivi afin d'éviter une contamination des sols au travers l'épandage.

À ce jour, les traitements thermiques semblent être la seule solution viable menant à la destruction de tout contaminant. Cependant, il doit se faire dans les bonnes conditions opératoires et les molécules à détruire.

Dans un document publié en 2023, l'INERIS a constaté que certains PFAS peuvent être détruits à de très faibles températures, dès 200 °C, mais la majorité des molécules se dégradent plus systématiquement entre 1000 et 1200 °C. Toujours dans la même étude, il apparaît qu'une augmentation de la température ne conduit pas nécessairement à une destruction généralisée des substances mais suggère la création de sous-produits de combustion PFAS à chaîne courte et plus stable thermiquement. Menant ainsi à leur volatilisation puis décomposition en phase gazeuse, bien que des températures supérieures à 1000°C conduiraient à une destruction quasi-complète des PFAS (de l'ordre de 99%).

Toutefois, des travaux de recherche s'accordent pour dire qu'une minéralisation complète des PFAS, donc sans sous-produits, n'est possible qu'à des températures de fours de plus de 1400°C (en cimenterie).

Les températures de combustion atteintes dans les unités de valorisation énergétique et incinérateurs de boues conduiraient par conséquent à la destruction d'une grande partie des PFAS présents dans les déchets et résidus de traitement solides. Les PFAS qui ne seraient pas détruits dans les fours sont captés dans le système de traitement des fumées. Les études prouvent que les PFAS sont piégés par le charbon actif et le coke de lignite, c'est à dire des réactifs très couramment utilisés pour traiter les fumées avant leurs rejets. Les premières mesures réalisées dans des usines de valorisation énergétique à l'étranger indiquent des valeurs résiduelles dans les fumées de l'ordre de quelques ng/Nm³. Ces observations suggèrent que les unités de valorisation énergétique des déchets pourraient techniquement capter la majeure partie des PFAS et empêcher leur dissémination dans l'environnement.

3.6. Les actions préventives

Il apparaît nécessaire de coupler aux actions curatives, des actions préventives. Dans un rapport d'évaluation, la Cour des Comptes a rappelé que le coût d'actions préventives face aux micropolluants est 2,5 fois moins cher que celles curatives. Mais AMORCE souhaite sortir de l'opposition préventif/curatif, pour favoriser plus de cohérence entre les objectifs de résultats et les moyens imposés. Et ainsi se préparer à financer les deux alternatives.

Même en cas de traitement, les actions préventives sont indispensables. Quelle que soit la filière choisie, les solutions de réduction à la source des émissions de pesticides, ou de PFAS, sont nécessaires pour des raisons aussi bien sanitaires qu'environnementales. En effet, la portée des traitements n'est que transitoire et ne va résoudre qu'une partie des problèmes sanitaires posés par l'usage de substances toxiques. En effet, la part de l'eau dans l'exposition aux pesticides via l'alimentation totale est inférieure à 5%. Cependant, les consommateurs n'ont pas le choix dans leur approvisionnement en eau : ils peuvent choisir les aliments qu'ils achètent, mais ils sont captifs de leur fournisseur en eau potable pour tous les usages sanitaires de l'eau (à l'exception des eaux embouteillées). Ainsi, seules les actions de réduction à la source peuvent limiter non seulement la présence globale de pesticides dans l'alimentation (via les aliments solides et l'eau de



consommation), mais également l'exposition directe des riverains lors des épandages et les retombées sur l'environnement.

Les traitements ne sont pas des solutions pérennes à l'inverse des actions préventives qui sont plus systémiques.

Lorsque les bilans de qualité ont démontré la contamination persistante d'une ressource en eau utilisée pour la production d'eau potable, la mise en place d'un traitement d'élimination des phytosanitaires peut être justifiée comme solution transitoire. Cependant, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, notamment une analyse coûts-bénéfices à long terme et une étude de faisabilité technico-économique, en tenant compte de la durée des dérogations de consommation.

Or, face aux coûts de traitement souvent rédhibitoires de certains traitements, des collectivités préfèrent faire le choix de l'interconnexion afin de diluer les substances polluantes mais aussi pour s'orienter vers des process d'affinage moins coûteux.

Pour faire face aux ressources contaminées, plusieurs facteurs sont à considérer, outre les caractéristiques des substances présentes et des milieux aquatiques, les études et réflexions doivent intégrer :

- La faisabilité technique ou financière d'une substitution de ressource ou d'une interconnexion ;
- Les moyens financiers de la collectivité (population desservie) ;
- La possibilité de mettre en place des installations de traitement mobiles ;
- L'identification des sources de contamination ;
- La modification des pratiques agro-environnementales pour une réduction à la source.

Des collectivités comme le SMEP (Syndicat Mixte d'Eau Potable) du Jurançon, dans une politique de protection des AAC, fait régulièrement valoir le droit de préemption autour des captages dont il est gestionnaire afin de mobiliser la filière agricole vers des cultures « Zéro produits phytosanitaires ».

Enfin, les solutions de traitement des eaux potables ne doivent intervenir qu'une fois la réflexion sur l'origine de la pollution menée à son terme :

- Identification des captages pollués (à l'amont d'une même unité de distribution) ;
- Identification et traitement, si possible, des sources de pollution et des zones de transfert (si c'est un captage en nappe) ;
- Sinon, abandon ou déplacement du captage, changement de ressource ou, en cas de maintien du captage, traitement spécifique des eaux du ou des captages pollués, en réservant le traitement des PFAS aux seuls prélèvements d'eau le nécessitant. Beaucoup de traitements d'eau de finition ont montré leur efficacité sur les PFAS.



CONCLUSIONS

La problématique des PFAS et des métabolites de pesticides dans les eaux potables a nécessité une approche globale et réfléchie pour identifier et traiter les sources de pollution. Une démarche en plusieurs étapes clés a été présentée dans ce document, comprenant l'identification des captages pollués, le traitement des sources de pollution et des zones de transfert, l'abandon ou le déplacement du captage ou le changement de ressource, et le traitement spécifique des eaux ou des captages pollués.

Des solutions techniques, telles que le charbon actif et l'osmose inverse basse pression, ont été présentées dans ce document comme des moyens efficaces pour répondre aux nouvelles exigences en matière de traitement des eaux potables. Cependant, il est important de souligner que ces solutions ne doivent être envisagées qu'après avoir mené une réflexion globale sur l'origine de la pollution et avoir cherché à traiter les sources de pollution à la source.

Enfin, il a été souligné que l'adoption d'une approche holistique est essentielle pour la préservation de l'eau potable en France. Cela implique de prendre en compte les facteurs environnementaux, sociaux et économiques dans la gestion de l'eau potable, ainsi que de promouvoir une utilisation durable et responsable de l'eau. En travaillant ensemble pour protéger nos ressources en eau, nous avons la possibilité de garantir un approvisionnement en eau potable sûr et fiable pour les générations futures.

Bien que ce document ne s'intéresse qu'aux EDCH et eaux brutes servant à leur production, l'imprégnation par les PFAS des matrices environnementales est bien plus large. Il convient de s'intéresser à la gestion dans les incinérateurs d'OM, de boues mais aussi dans les lixiviats et dans les eaux usées.

Une publication sur la gestion des micropolluants dans les stations d'épuration est à paraître par AMORCE.

Pour aller plus loin

Adhérez à AMORCE et participez aux échanges de son réseau



Consultez nos précédentes publications

- Lettre aux Adhérents [#81](#), Dossier Eau sur les PFAS, AMORCE 2024.
- [EAJ 10 - Nouveau cadre eau potable et collectivités territoriales : comment assurer un accès à une eau de qualité pour tous ?, AMORCE 2024.](#)

Consultez nos évènements dédiés :

- Congrès AMORCE 2023 – [Forum Eau – Pesticides et leurs métabolites : Quels enjeux et quelles actions ?](#)
- Congrès AMORCE 2024 – [Forum Déchets/Eau – Les PFAS dans les installations de traitement des eaux et des déchets : focus sur le plan d'actions interministériel et ses effets](#)

Réalisation

AMORCE, Pôle Eau, Jérémie DA PRATO

AMORCE

18, rue Gabriel Péri – CS 20102 – 69623 Villeurbanne Cedex

Tel : 04.72.74.09.77 – Fax : 04.72.74.03.32 – Mail : amorce@amorce.asso.fr Page 29/29

www.amorce.asso.fr - @AMORCE

