



Traitement des micropolluants dans les Stations d'épuration

PRÉAMBULE

À mesure que les gains de connaissances sur les micropolluants et pollutions émergentes dans les eaux se précisent, les pouvoirs décisionnaires européens et nationaux se voient dans la nécessité d'agir. Et avec les évolutions réglementaires, les collectivités organisent la surveillance de ces substances, notamment pour celles arrivant en stations de traitement des eaux usées (STEU).

Bien qu'essentiel, assurer une surveillance ne représente qu'une étape parmi celles à mettre en place pour une gestion efficace des contaminations par les micropolluants. En effet, avec l'actualisation de la Directive Eau Résiduaire Urbaines (DERU), votée à l'automne 2024, des exigences de gestion avec objectif de résultats pour le traitement de substances pharmaceutiques et cosmétiques deviendront obligatoires au sein des STEU de plus de 150 000 équivalent-habitants, ainsi que celles situées en zones sensibles.

Toutefois, AMORCE constate que la prise en charge et le traitement des micropolluants pourraient engendrer des coûts significatifs pour les collectivités. Les stations d'épuration actuelles ne sont généralement pas conçues pour éliminer efficacement ces substances. Adapter les installations existantes ou en développer de nouvelles pour traiter spécifiquement ces contaminants requiert des investissements significatifs, et peut engendrer des surcoûts opérationnels substantiels.

Principal point soulevé à l'occasion du Comité de Pilotage du Plan Micropolluants dans lequel AMORCE est partie prenante. La question pécuniaire ne peut être adressée que si les actions face à ces enjeux sont appliquées suivant le principe fondamental du « Pollueur-Payeur ». En effet, il sera plus facile de soustraire les risques de contamination persistante des eaux et des boues d'épuration via des financements adéquats impliquant les pollueurs. Il s'agira alors de mettre en place des stratégies préventives de régulation des activités polluantes en amont des STEU pour prévenir desdits risques et de prévoir des traitements pour gérer les pollutions historiques.

Face à cette problématique complexe, il est crucial pour les collectivités de comprendre comment adapter leurs infrastructures et stratégies vis-à-vis des pollutions dans les eaux usées. Une collaboration étroite entre les autorités réglementaires, les centres de recherche et les services d'assainissement s'impose pour développer des solutions viables et durables. Qu'elles soient préventives, comme c'est le cas pour actions menées dans le cadre de la démarche RSDE STEU, ou curatives comme il sera discuté dans le présent document.

Cette note technique vise à explorer les technologies disponibles pour une gestion curative des micropolluants. Quelques retours d'expériences sont présentés pour illustrer des approches efficaces. Il reste cependant évident que ces actions curatives doivent être prises dans le cadre d'une réflexion plus globale face aux micropolluants.

1. Cadre réglementaire et évolutions

1.1 Quelques notions et définitions

1.1.1 Les micropolluants

Souvent d'origine anthropique et liés aux modes de vie, les pollutions chimiques proviennent de l'utilisation d'une très large variété de produits, y compris du quotidien. En effet, produits d'hygiène rincés, produits phytopharmaceutiques ou encore détergents domestiques/industriels contiennent de nombreuses substances chimiques (naturelles ou synthétiques) dont une part vont se retrouver dans le milieu naturel.

Ce sont ces micropolluants (métaux lourds, pesticides et leurs métabolites, per- et polyfluoroalkylés (PFAS), plastiques, hydrocarbures, résidus médicamenteux, etc.) qui mettent directement en péril le cycle de l'eau, les masses d'eau et la biodiversité qui la compose, et par extension la santé humaine, et ce même à faibles concentrations. Le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT) les définit ainsi :

« Substances indésirables détectables dans l'environnement à très faibles concentrations (μg (microgramme)/L voire ng (nanogramme)/L). Leur présence est, au moins en partie, due à l'activité humaine et peut à ces très faibles concentrations engendrer des effets négatifs sur les organismes vivants en raison de leur toxicité, de leur persistance et/ou de leur bioaccumulation ».

La problématique des micropolluants est vaste et dépasse largement le monde de l'eau par le caractère ubiquiste de certaines substances. Les inquiétudes sont nombreuses. Si leur présence est avérée dans la plupart des milieux, il reste difficile d'identifier tous les effets néfastes que les micropolluants peuvent entraîner sur l'environnement et la santé humaine, en particulier les effets cocktails.



Alors que plus de 100.000 substances chimiques sont référencées en Europe et de 200 à 300 nouvelles entrent sur le marché tous les ans, il apparaît alors difficile de déterminer avec précision lesquelles peuvent être classées comme micropolluants. Toutefois, environ 900 substances sont considérées comme telles.

La diversité et la multitude de polluants existants sont autant d'effets possibles sur les milieux et les organismes vivants.

Source : [Que sait-on des micropolluants dans les eaux urbaines ? \(OFB, ARCEAU\)](#)

Il existe des substances dont les effets sont bien connus et observables. C'est le cas notamment des perturbateurs endocriniens dont les conséquences sur les populations de poissons rendent compte du problème (changement de sexe d'individus entraînant des problèmes de reproduction et risques pour l'espèce).

Les villes, en concentrant de nombreux usages différents de produits chimiques (usages domestiques, secteurs de la santé, transports et aménagements urbains, etc.) constituent un vecteur important de transferts de pollutions vers les milieux aquatiques, notamment via les eaux urbaines (eaux usées ou pluviales). Et, bien qu'elles en abattent une grande partie, les STEU domestiques ou industrielles ne parviennent que partiellement à épurer tous les micropolluants.

Il est donc plus que jamais nécessaire d'avoir des actions concrètes ; aux niveaux national et européen via des lois et réglementations ; aux niveaux des régions via la mise en place de plans de surveillance, de mesures de prévention à la source, dont la démarche RSDE STEU, et d'actions correctives.

1.1.2 La transversalité des réglementations

Alors que la connaissance sur les substances mérite d'être consolidée, l'Union européenne cherche à renforcer ses positions réglementaires pour protéger au mieux la santé humaine et les écosystèmes exposés aux micropolluants.

L'union européenne fixe l'objectif d'un environnement sans substances toxiques en 2030/2050

Mais, les lois et directives devront s'adapter à mesure que la compréhension des micropolluants se précise, tout en restant suffisamment lisibles pour les élus de collectivités. Les multiples sources et la multi-exposition des milieux rendent le système complexe et des verrous scientifiques subsistent, tant sur l'analyse des substances, que sur la manière de les traiter.

C'est pourquoi des mesures d'amélioration de la connaissance ont été d'abord mises en place dans la Directive cadre sur l'eau (DCE). Les maîtres d'ouvrage des stations d'épuration d'une capacité supérieure à 10 000 équivalents habitants doivent mettre en place une démarche RSDE (Recherche et Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans les Eau) afin de caractériser les micropolluants et d'identifier leur origine pour mettre en place un plan d'action de réduction à la source. **L'analyse de la dernière campagne montre une présence quasi systématique d'au moins un micropolluant dans les eaux de rejets des stations d'épuration concernées par la démarche RSDE ([Rapport INERIS](#))**. Le glyphosate et son produit de dégradation l'AMPA étant quantifié à presque 100% en sortie de stations mais ce sont les métaux lourds (cuivre, zinc, plomb) qui sont les éléments les plus souvent retrouvés dans les rejets.

La DCE fixe les objectifs de « Bon état » (chimique, écologique et quantitatif) à atteindre pour toutes les masses d'eau. En appui, la Directive Eaux Résiduaires Urbaines définit les moyens pour y arriver et sa nouvelle version renforce les exigences réglementaires de performance de traitement en rendant obligatoire le traitement des micropolluants (Voir [1.4](#)). Ainsi, la mise en place d'un traitement des micropolluants sur les STEU permettra de contribuer à la préservation des milieux naturels mais aussi d'anticiper les évolutions réglementaires futures.

Dans le cadre de la préservation des systèmes d'assainissement collectif, [l'article 13 de l'arrêté du 21 juillet 2015](#) précise les conditions de raccordement des eaux usées **non domestiques** à un système de collecte. Il impose que ces eaux ne compromettent pas le bon fonctionnement des ouvrages d'assainissement ou ne dégradent pas la qualité des rejets. Si des micropolluants rejetés nuisent à l'atteinte du « Bon État » ou dégradent le milieu récepteur, des investigations et mesures correctives doivent être menées. Ce cadre réglementaire responsabilise tant les producteurs d'eaux usées que les maîtres d'ouvrage.

Plus généralement, dans le cadre du « [Pacte Vert Européen](#) » et du plan d'actions « [zéro pollutions](#) », l'Union Européenne fixe des dispositions réglementaires pour la réduction des polluants.

1.2 Directive-Cadre sur l'eau

La **Directive-Cadre sur l'Eau** (DCE) fixe les objectifs et critères de qualité pour atteindre le « **Bon État** » pour les masses d'eaux (souterraines et surfaces) avec réductions des polluants dont font partie certains polluants émergents.

Retranscrite en droit français au niveau des grands bassins hydrographiques au travers de SDAGE, la DCE transposée intègre 3 arrêtés : « **Surveillance** », « **Délimitation** » et « **Évaluation** ». Ils encadrent et définissent les programmes de surveillance, le cadre pour l'analyse des incidences des activités humaines et les règles d'évaluation de l'état des masses d'eaux. Des paramètres et valeurs seuils associés sont définis, notamment avec les listes de substances pertinentes à surveiller, dont font partie les micropolluants.

Concernant les micropolluants et l'état des masses d'eau, les données chimiques priment. Dans le sens où ce sont leur concentration dans le milieu qui risquent déclasser vers un « Mauvais État ». Selon le dernier état des lieux ([EauFrance](#), 2019) :

- 67% des eaux de surface affichent un "Bon État", les HAP, pesticides et métaux lourds étant responsables du déclassement des 33% restants.
- 71% des eaux souterraines sont en "Bon État", les pesticides et nitrates étant à l'origine de la plupart des déclassements.

1.3 La Recherche et Réduction de Substances Dangereuses dans les Eaux (RSDE)

Intégrées dans la mise en œuvre de la DCE depuis 2002, les campagnes RSDE ont pour objectifs de quantifier l'évolution des pressions ponctuelles sur les milieux aquatiques par les substances jugées prioritaires et de réduire progressivement leur rejet, perte et émission. Au total, ce sont six séries de mesures en entrée et en sortie des STEU de plus de 10 000 EH qui sont demandées, elles concernent 96 substances en entrée et 89 substances en sortie ([lien](#) de la note technique).

Les dernières données disponibles de la campagne 2016-2021 (voir le rapport INERIS mentionné plus haut) mettent en lumière les substances les plus préoccupantes, notamment des métaux lourds, des pesticides, le DEHP (plastifiant), les nonylphénols, des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), et les octylphénols en entrée de station, et des métaux lourds, des pesticides, le DEHP, et le PFOS (PFAS) en sortie de station.

En ce qui concerne les médicaments et cosmétiques, substances visées par la nouvelle version de la DERU, elles ne font l'objet d'aucune réglementation pour les rejets d'eaux usées traitées. Pour la nouvelle campagne RSDE (2022-2027) l'objectif est de poursuivre l'acquisition de connaissances sur la base des mêmes 96 déjà étudiées. Et une [liste optionnelle](#) de 28 polluants incluant des métabolites de pesticides et des médicaments peuvent compléter les analyses obligatoires.

AMORCE alerte sur les coûts supplémentaires engendrés par les analyses facultatives, en particulier pour les médicaments.

La recherche de significativités :

En entrée de STEU, un micropolluant sera considéré comme significatif s'il remplit un des critères suivants :

- Sa **concentration moyenne annualisée est supérieure à 50 fois la norme de qualité environnementale**, en valeur moyenne annuelle, prévue dans l'arrêté relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface ;
- Sa **concentration maximale mesurée est supérieure à 5 fois la norme de qualité environnementale**, en concentration maximale admissible ;
- Les **flux annuels estimés sont supérieurs aux seuils de déclaration dans l'eau** prévus par l'[arrêté Gerep](#) (arrêté du 31 janvier 2008, modifié en 2020, relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets).

En sortie de STEU, un micropolluant sera considéré comme significatif s'il remplit un des critères suivants :

- Sa **concentration est supérieure à 10 fois la norme de qualité environnementale**, en valeur moyenne annuelle ;
- Sa **concentration maximale mesurée est supérieure à la norme de qualité environnementale**, en concentration maximale admissible ;
- Le **flux moyen journalier est supérieur à 10% le flux théorique admissible par le milieu récepteur**, sauf si le rejet a lieu dans les eaux côtières ou en milieu marin ;
- Les **flux annuels estimés sont supérieurs aux seuils de déclaration dans l'eau** prévu par l'arrêté Gerep ;
- La **masse d'eau dans laquelle rejette la STEU est déclassée, sur la base de l'état chimique et écologique de l'eau le plus récent** (sauf HAP), le service de police de l'eau indiquant alors au maître d'ouvrage de la station les micropolluants qui provoquent ce déclassement.

Dès lors que les campagnes d'analyses mettent en évidence des substances significatives en entrée et/ou en sortie d'une STEU, **un diagnostic à l'amont** est demandé. C'est une étude dont l'objectif est de déterminer la ou les sources possibles des substances détectées et de proposer un plan d'actions de prévention ou de réduction à mettre en place pour réduire leur arrivée en STEU.



Quelques ressources en lien avec le RSDE et le diagnostic à l'amont, publiées par l'ASTEE :

- [Foire aux questions Diagnostic vers l'amont RSDE STEU](#), rassemble les principales questions des collectivités sur le sujet
- [Diagnostic amont et plan d'action pour la réduction des micropolluants : Cahier des Clauses Techniques Particulières \(CCTP\)](#), précise le contenu de la mission de réalisation du diagnostic amont
- [Grille d'analyse Diagnostic vers l'amont RSDE STEU](#), précise les attentes relatives au contenu des études

1.4 La Directive Eaux Résiduaires Urbaines

Adoptée en 1991 et transposée en 1994 en droit français, la Directive Eaux Résiduaires Urbaines (DERU) a pour objectif de protéger l'environnement contre toute détérioration due aux rejets des eaux ménagères usées ou mélange d'eaux ménagères avec des eaux industrielles usées et/ou des eaux de ruissellement.

Cette [directive](#), en révision depuis 2022, adoptée fin 2024 (voir le [décryptage](#) par AMORCE) prend en compte, dans sa nouvelle version, un grand ensemble des enjeux de la transition écologique. La transposition en droit français est prévue pour 2027.

En établissant des nouvelles règles sur la collecte, le traitement et le rejet des eaux usées urbaines, cette révision de la Directive de 1991, conformément à l'approche « [One Health \(Une Seule Santé\)](#) » renforce la protection de l'environnement et la santé humaine contre les potentiels rejets nocifs des eaux urbaines résiduaires.

Nota : One Health est une approche intégrée de la santé humaine, environnementale et animale visant à améliorer durablement l'ensemble. Elle propose de prévenir et gérer l'ensemble des risques sanitaires à travers une approche pluridisciplinaire et globale.

En lien étroit avec la Directive-Cadre sur l'eau, cette nouvelle DERU établit les règles sur l'accès à l'assainissement pour tous. Elle permettra également d'éviter toute contamination des milieux aquatiques récepteurs, tout en réduisant progressivement les émissions de gaz à effet de serre, en améliorant le bilan énergétique des activités de collecte et de traitement des eaux usées tout en contribuant à une transition vers une économie circulaire.

Parmi les principales évolutions par rapport à la directive de 91, il est à noter :

- L'extension de la Directive aux systèmes de collecte de 1000 EH (Équivalent-Habitants) et plus,
- L'installation de traitements secondaires (traitement biologique qui abat la matière organique) sur l'ensemble des systèmes d'assainissement visés par la DERU,
- Le durcissement des valeurs limites en azote et phosphore,
- L'introduction de la nécessité de traiter les micropolluants,
- La Responsabilité Élargie des Producteurs sur les produits cosmétiques et médicaments,
- La neutralité énergétique, c'est-à-dire une production d'énergies renouvelables (et de récupération) suffisante pour compenser les consommations énergétiques des systèmes d'assainissement supérieur à 10 000 EH.

- La surveillance des rejets, y compris dans les boues d'épuration, ainsi que des paramètres de santé publique pertinents dans les eaux usées.

Plus précisément, sur le sujet de la présente note, la version révisée de la DERU demande d'installer des traitements quaternaires aux stations qui n'en sont pas encore équipés. Ce sont tous les traitements avancés (filtre sur charbon actif, ozonation, nanofiltration, osmose inverse, etc.) servant à abattre les micropolluants et les pollutions émergentes (métabolites de pesticides, résidus médicamenteux, etc.).

Ils sont rendus obligatoire pour les STEU de **taille supérieure à 150 000 EH** (ou 10 000 EH en zones sensibles à l'accumulation de micropolluants*) **à horizon 2045**. L'objectif étant ambitieux, des **points d'étape** devront être respectés :

- Au 31 décembre 2033, les rejets de 20% des STEU de plus de 150 000 EH respecteront les exigences de rejets sur les micropolluants,
- D'ici le 31 décembre 2039, les rejets de 60 % des STEU de 150 000 EH et plus,
- D'ici le 31 décembre 2045, toutes les STEU de 150 000 EH et plus répondent aux exigences en matière de traitement tertiaire.

Dans les **zones sensibles à l'accumulation de micropolluants**, les exigences de traitement quaternaire s'appliqueront aux rejets des STEU de 10 000 EH et plus, selon le **calendrier suivant** :

- 31 décembre 2033 pour 10 % des STEU,
- 31 décembre 2036 pour 30 % des STEU,
- 31 décembre 2039 pour 60 % des STEU,
- 31 décembre 2045 pour l'ensemble des STEU en zone sensible.

D'ici le 31 décembre 2030, l'ensemble des États membres auront à établir la **liste des zones sensibles à l'accumulation des micropolluants*** issus des rejets des STEU sur leur territoire (mise à jour tous les 6 ans). **Elles comprennent** :

- Les zones de captage d'eau potable, telles que caractérisées dans la Directive Eau Potable, sauf si les rejets des STEU ne constituent pas un risque pour la santé humaine.
- Les eaux de baignade relevant du champ d'application de la directive 2006/7/CE, sauf si les rejets des STEU n'affectent pas les eaux de baignade et ne compromettent pas la santé des baigneurs.
- Les zones où se déroulent des activités aquacoles, telles que définies dans le règlement (UE) n° 1380/2013, sauf si les rejets des STEU ne constituent pas un risque.
- Les lacs et les cours d'eau où le rapport de dilution est inférieur à 10.
- Les zones spéciales de conservation et les zones de protection spéciale constitutives du réseau écologique Natura 2000.
- Les eaux côtières, les eaux de transition et les eaux marines telles que définies dans leurs directives respectives.

Nota : Si une évaluation des risques dans une de ces zones ne montre pas de danger pour l'environnement ni la santé humaine à cause des micropolluants, alors il n'y aura pas d'obligation d'installer des traitements quaternaires pour les STEU de 10 000 EH ou plus. La règle s'appliquera toujours pour celle de 150 000 EH ou plus.

Concrètement, **12 micropolluants organiques** (cosmétiques et produits pharmaceutiques), seront visés par l'obligation de traitement qui s'aligne parfaitement avec la préservation des milieux et l'atteinte du « Bon état » des masses d'eau au sens de la Directive-Cadre sur l'Eau. La réglementation Suisse vise depuis 2016 ces mêmes micropolluants, offrant quelques retours d'expériences sur les technologies installées, leur coût, leur fonctionnement et leur performance.

Catégorie 1 - Substances pouvant très facilement être traitées	Catégorie 2 - Substances pouvant facilement être éliminées
Amisulpride (CAS No 71675-85-9)	Benzotriazole (CAS No 95-14-7)
Carbamazépine (CAS No 298-46-4)	Candésartan (CAS No 139481-59-7)
Citalopram (CAS No 59729-33-8)	Irbésartan (CAS No 138402-11-6)
Clarithromycin (CAS No 81103-11-9)	Mélange de 4-méthylbenzotriazole (CAS No 29878-31-7) et de 5-méthylbenzotriazole (CAS No 136-85-6).
Diclofénac (CAS No 15307-86-5)	
Hydrochlorothiazide (CAS No 58-93-5)	
Métoprolol (CAS No 37350-58-6)	
Venlafaxine (CAS No 93413-69-5)	

Liste des micropolluants identifiés dans le cadre de la révision de la DERU

Afin de soutenir au mieux les collectivités, le texte révisé de la DERU propose **d'instaurer une Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) sur les produits cosmétiques et les médicaments pour financer les traitements avancés contre les micropolluants.**

Potentiellement 200 molécules issues d'usages pharmaceutiques et cosmétiques seraient concernées par la REP. Le choix de ces substances sera issu de deux textes européens :

- Directive 2001/83/EC instituant un code communautaire relatif aux médicaments à usage humain.
- Règlement No 1223/2009 relatif aux produits cosmétiques.

Ce serait une **contribution de 80% minimum** des producteurs de cosmétiques et de médicament vers du financement des solutions de traitement au travers de la REP. Le reste de la répartition étant à la charge des États membres. Une **exonération** sera mise en place pour les producteurs de produits contenant des micropolluants pouvant justifier :

- Que les quantités de substances contenues dans les produits mis sur le marché européen ne dépassent pas 1 tonne par an,
- Que les substances présentes dans les produits mis sur le marché se biodégradent rapidement dans les eaux usées ou ne génèrent pas de micropolluants dans les eaux usées.

Nota : Une obligation de mise en place de nouvelles technologies de traitement aura nécessairement une répercussion sur les consommations énergétiques des systèmes d'assainissement et par extension sur l'objectif de neutralité énergétique.

1.5 Plan interministériel sur les PFAS : Inclure l'assainissement dans les réflexions

Préoccupation grandissante pour l'ensemble des collectivités et des usagers, les impacts des PFAS sur la santé humaine et la biodiversité sont à. Depuis 2023 le gouvernement s'est engagé dans un plan d'actions dédiés à ces polluants dits « éternels » [Mis à jour](#) en 2024 par un travail conjoint entre les ministères chargés de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, de l'Industrie, du Travail et de la Santé, de l'Intérieur, de l'Agriculture, des Armées, de la Recherche, (voir le [décryptage](#) par AMORCE). 26 actions réparties en 5 grands Axes le composent :

1. Acquérir des connaissances sur les méthodes de mesures des émissions, sur la dissémination et les expositions
2. Améliorer, renforcer la surveillance et mobiliser les données qui en sont issues pour agir
3. Réduire les risques liés à l'exposition aux PFAS, restreindre largement la présence des PFAS dans les produits pour réduire les risques
4. Innover en associant les acteurs économiques et soutenir la recherche
5. Informer pour mieux agir.

L'enjeu est donc essentiellement placé sur la montée en compétence et en connaissances de l'ensemble des acteurs concernés, dont les pouvoirs publics. L'idée étant de comprendre où sont les principaux vecteurs de contamination pour ensuite réduire l'impact de ces substances sur l'environnement et la santé humaine, au travers notamment de réglementations plus restrictives.

Sur l'assainissement, l'enjeu est à la surveillance, l'Action 3 de l'Axe 2 propose de renforcer les dispositifs de surveillance des émissions (aqueuses et gazeuses) des STEU, des installations d'incinération (y compris de boues d'épuration) et dans les matières fertilisantes, qui comprend aussi les boues d'épuration.

L'amélioration des connaissances et la caractérisation des sources d'émission des PFAS suppose plusieurs campagnes de mesures :

- Un programme de contrôle dans les eaux usées traitées des STEU, mis en place courant 2024 et qui concerne les installations de plus de 10 000 EH
- Une [campagne de mesures](#) (entre septembre 2023 et juin 2024) des PFAS dans les rejets aqueux des ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement) soumises à autorisation. L'analyse des résultats est en cours auprès des DREAL (Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement).
- Des [analyses](#), débutées en novembre 2024, à effectuer dans les émissions atmosphériques des installations de traitement thermique de déchets.
- Un programme de surveillance (Action 4 de l'Axe 2) qui concerne les matières fertilisantes dans le programme de surveillance. L'objectif est de déterminer des seuils d'innocuité et des flux maximums admissibles pour les PFAS, afin de prévenir la contamination des sols agricoles.

2. Défi de maîtrise des rejets et défi financier

2.1 Face à la contamination, comment prioriser les actions ?

Sans interventions appropriées pour traiter les micropolluants, le risque de contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques reste préoccupant. D'autant que ces substances, notamment les résidus pharmaceutiques, les pesticides, ou les produits cosmétiques, peuvent avoir des effets néfastes même à de faibles concentrations.

Le gouvernement et les groupes de travail sont attentifs au transfert des micropolluants des eaux usées traitées vers les boues d'épuration, ceci est notamment vrai pour les molécules les plus hydrophobes qui seront adsorbées sur des matrices solides (voir le [projet AMPÈRES](#)). En particulier si les boues se retrouvent utilisées comme amendements agricoles, il y a un risque de transfert de ces substances vers les cultures, [comme le précise l'OFB \(Office Français de la Biodiversité\)](#), affectant potentiellement la sécurité alimentaire et exposant les populations à des risques pour la santé à long terme. Des projets de recherche étudient ce phénomène de transfert des boues vers les cultures. C'est notamment le cas de [Téléspore](#), dont les [conclusions](#) indiquent une mobilité restreinte des micropolluants étudiés (résidus pharmaceutiques, biocides et leurs métabolites) pour les épandages et donc une quasi absence d'accumulation dans les sols.



Le plan interministériel PFAS a d'ailleurs introduit l'idée d'une surveillance de ces polluants dans les matières fertilisantes, dont font partie les boues. Il convient de connaître la teneur en PFAS de ces matières fertilisantes afin de s'assurer que les pratiques de fertilisation n'occasionnent pas de transferts de PFAS dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine ou animale. Au regard des résultats de cette action, la nécessité de définir des seuils d'innocuité et de flux maximum pour les PFAS dans les matières fertilisantes sera explorée.

D'un point de vue macro vis-à-vis de la contamination globale, les actions à envisager sont les suivantes :

- **Améliorer les connaissances**, tant sur l'état des matrices impactées que sur les molécules en elles-mêmes.

Ces dernières années, un effort concerté des différents acteurs du domaine de l'eau a permis de renforcer la surveillance des milieux aquatiques en France. Cela s'est traduit par des campagnes exploratoires, des diagnostics environnementaux, et des exercices de priorisation qui ont permis d'établir des listes de substances pertinentes à surveiller. L'objectif est double : anticiper la surveillance des micropolluants émergents ou non réglementés, et réviser les listes de substances existantes afin de garantir une efficacité optimale des actions de dépollution.

Le 3^{ème} Plan Micropolluants (2016-2021) illustre cet effort puisque l'une de ses priorités était de dresser des listes de micropolluants à cibler en priorité. Face au grand nombre de substances présentes dans les eaux, la constitution de ces listes reposait sur des critères de priorisation rigoureux. Les substances pour lesquelles les connaissances environnementales sont insuffisantes, celles qui présentent un risque pour l'atteinte des objectifs de « Bon État », ainsi que celles pour lesquelles une réduction des émissions est réalisable en tenant compte des solutions techniques, de leur coût et de leur efficacité doivent ainsi être priorisés.

- **Agir à l'amont des STEU.** Appliquer le principe de réduction à la source des émissions polluantes reste la méthode la plus pertinente pour éviter la contamination des milieux. Il permet en outre d'atténuer pour la collectivité la charge de dépollution et de mieux répartir l'action entre acteurs.
- **Mettre en place des solutions curatives.** Objet principal du présent document, les traitements spécifiquement dédiés à la gestion des micropolluants représentent une approche intéressante dans le cadre de pollutions ponctuelles et/ou historiques. Cette approche reste toutefois une solution palliative qui ne corrige pas les problèmes de fond, en particulier celles des pollutions chroniques.

AMORCE souhaite rappeler que la solution se trouve à la fois dans la mise en place d'actions préventives et d'actions curatives. Les 2 approches sont complémentaires, en cohérence entre les objectifs de résultats et les moyens imposés. S'il est souvent question du caractère « émergent » de certains micropolluants, des pollutions

historiques existent et elles doivent être traitées au même titre que les autres afin d'éviter toute accumulation ou recontamination dans le milieu.

Pour les STEU susceptibles d'avoir besoin de traitements quaternaires, il est du rôle du maître d'ouvrage d'initier le projet, en collaboration avec l'exploitant, par une étude menée dans le but de déterminer quelle technologie sera la plus adaptée aux caractéristiques des eaux usées, aux contraintes d'exploitation et aux objectifs à atteindre.

Ainsi, pour mettre en place un traitement efficace, qui respecte les exigences réglementaires, le collectif [AQUAGIR](#) dont AMORCE fait partie propose aux services assainissement une démarche en [4 étapes](#) :

- **Étape 1** : Examiner les résultats de la démarche RSDE, afin de caractériser et identifier au mieux les micropolluants et leur origine, et évaluer l'intérêt de compléter cette démarche avec un traitement des micropolluants
- **Étape 2** : S'inspirer des expériences de collectivités comparables ayant mis en œuvre le traitement des micropolluants dans les eaux usées
- **Étape 3** : Mener une étude technique et économique pour déterminer la technologie de traitement la plus adaptée au projet
- **Étape 4** : Mettre en place le traitement choisi et former le personnel à l'exploitation de cette nouvelle unité de traitement

Une fois le traitement en place, sa réussite peut se mesurer selon des critères d'évaluation et de surveillance. Ils sont à définir en lien avec le respect des exigences d'atteinte du « Bon État » des masses d'eaux de la DCE, la préservation des systèmes d'assainissement, mais également les nouvelles significativités relevées par les mesures effectuées dans le cadre du RSDE et les éventuelles exigences associées à la future DERU. En résumé :

- Critères de qualité des eaux rejetées en sortie de station d'épuration ;
- Critères de qualité des eaux rejetées dans une aire d'alimentation de captage ;
- Critères de qualité du milieu récepteur.

2.2 Impact financier du traitement des micropolluants pour les collectivités

L'intégration de technologies avancées pour le traitement des micropolluants dans les STEU impose aux collectivités locales le double défi de générer des coûts d'investissements importants et des suppléments de dépenses d'exploitation significatives.

Dans le cadre de cette note, il y sera essentiellement fait référence à l'adaptation et/ou la modernisation des infrastructures de traitement des eaux usées pour y inclure les processus capables d'éliminer efficacement les micropolluants. Or l'intégration de nouveaux moyens de traitement sont des dépenses qui peuvent vite représenter un fardeau financier pour les collectivités, en particulier pour celles avec des ressources limitées.

Les coûts de gestion qu'ils imposent peuvent se décomposer en 2 catégories :

- Les coûts d'investissement initiaux, qui correspondent à l'installation de nouveaux équipements, tels que les systèmes d'ozonation ou les filtres à charbon actif,
- Et les coûts de fonctionnement, incluant l'entretien de ces équipements, la consommation d'énergie, et les matériaux consommables.

2.2.1 Coûts d'investissement (CAPEX)

L'intégration de nouvelles technologies de traitement des micropolluants représentera un budget non négligeable pour les collectivités. Ces dépenses couvrent à la fois l'acquisition des équipements et l'adaptation des infrastructures déjà en place. Elles seront largement influencées par la complexité des équipements au regard de la part de polluants à abattre.

Comme tout projet de travaux prévus sur une station, l'élaboration requerra des études techniques, analyses de faisabilité et plans de gestion de projet à prendre en compte en tant que frais de conception, d'ingénierie et de maîtrise d'œuvre. Ces frais supplémentaires qui peuvent représenter **[10 et 15 %](#) du coût total** sont

essentiels pour s'assurer que les nouvelles installations répondront aux exigences techniques et réglementaires.

Enfin, l'intégration de nouvelles technologies requerra une mise à niveau des infrastructures existantes pour assurer une bonne intégration des nouveaux procédés dans la STEU existante. Il s'agit généralement, de travaux de restructuration qui vont de la rénovation de canalisation, au renfort des installations électriques, jusqu'à la construction de nouveaux bâtiments.

2.2.2 Coûts d'exploitation (OPEX)

Ils incluent l'entretien des nouveaux équipements, la consommation d'énergie, les matériaux consommables, les compétences RH supplémentaires.

Au-delà des investissements initiaux, les coûts d'exploitation des technologies avancées pèsent également lourdement sur les budgets des services d'assainissement. L'enquête sur les consommations énergétiques dans les Services Publics d'Eaux et d'Assainissement (SPEA) réalisée par AMORCE ([EAT 10](#)) l'avait déjà mis en avant, de **10 à 20% du budget d'un SPEA est réservé à la dépense énergétique, ce qui en fait l'un des principaux postes de dépenses opérationnelles.**

L'ajout d'un traitement des micropolluants peut faire augmenter cette part. C'est le cas des technologies telles que l'ozonation ou les systèmes d'ultra/nanofiltration qui bien que très efficaces sont particulièrement énergivores. L'ozonation peut engendrer une augmentation de 10 à 30% de la consommation énergétique globale d'une STEU ([EAWAG, 2012](#)).

À l'augmentation de la facture énergétique, il faut ajouter l'ensemble des coûts relatifs à la maintenance des équipements. Le bon fonctionnement des systèmes de traitement repose sur un entretien régulier et souvent coûteux. Point qui est particulièrement vrai pour des technologies avancées qui doivent traiter des molécules spécifiques.

Parmi les technologies de traitement des micropolluants qui requièrent un entretien régulier :

- Les filtres dans les process de filtration sur charbon actif doivent être remplacés en fonction de leur saturation afin de maintenir leur efficacité,
- Les générateurs d'ozone nécessitent un suivi constant pour éviter les défaillances.

L'ensemble de ces opérations vient alourdir les OPEX et doit être pris en compte dans les prévisions budgétaires des services d'assainissement, au même titre que les moyens humains qualifiés pour garantir une exploitation optimale de ces technologies de traitement des micropolluants.

2.2.3 Quelques données économiques relatives aux traitements quaternaires

L'évaluation des coûts associés aux technologies de traitement des micropolluants reste un enjeu crucial. Or, à ce jour, seulement quelques études quantifient réellement ces coûts de manière globale. Chaque situation reste unique puisque la contamination (les molécules à traiter), le contexte de traitement, ainsi que la qualité du milieu récepteur varient d'une STEU à une autre.

En France, le projet d'amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques ([ARMISTIQ](#)) réalisé en 2014, évalue **le besoin d'investissement et de fonctionnement entre 2 et 20€/EH/an, selon les technologies choisies**. Ce projet prend en compte l'ensemble des coûts d'investissement et d'exploitation pour différentes tailles de STEU et a mis en évidence l'importance de la taille des installations dans les coûts totaux.

Pour mieux standardiser les comparaisons, le projet ARMISTIQ a utilisé une taille de référence pour les STEU de 200 000 EH. Ce critère permet de générer des estimations plus homogènes et facilite la comparaison entre les différentes technologies. De plus, **ARMISTIQ calcule les coûts sur une période de 20 ans de fonctionnement des STEU, avec un taux d'actualisation de 4%**. Ceci permettant d'intégrer les coûts globaux des infrastructures, tout en tenant compte des fluctuations potentielles dans le temps, notamment en matière de prix de l'énergie et des réactifs

Plus récemment en 2022, [une étude sur la recherche d'équilibre entre efficacité et coûts de traitement des micropolluants](#) rapporte des coûts d'installation compris entre **0,035 et 0,05 €/m³**, soit entre **1,9 et 2,75 €/EH/an**. Cet estimatif se base sur les CAPEX des technologies à charbon actif (en grain et en poudre) et à ozonation jugées les plus efficaces contre les micropolluants. L'approche est différente de celle proposée par ARMISTIQ, donc pour avoir une évaluation globale, il conviendrait de rapporter ces chiffres à des données plus empiriques comme le volume d'eaux usées traitées par les STEU ou la charge polluante abattue ou encore la technologie choisie.

Concernant les coûts de fonctionnement, à **0,04 €/m³** ils semblent relativement similaires donc indépendants des procédés choisis.

Cependant, il se peut que l'ensemble des coûts moyens mentionnés soient inférieurs à la réalité de terrain. Bien qu'il ne soit pas encore possible de tirer une conclusion claire sur le sujet car spécifique à un contexte local et du besoin d'amélioration des traitements existants, le procédé d'ozonation sur la STEU de Bouillides (voir [REX](#)), en 2012, avait un CAPEX à **24 € HT/EH**.

Nota : Depuis 2016, la Suisse a rendu obligatoire le traitement des pollutions émergentes dans ses 100 plus grandes STEU, mesuré selon les taux d'épuration de [12 molécules](#). Pour financer le projet, le pays a décidé d'installer une taxe nationale qui revient à 0,11€/m³.

2.3 Une limite à l'action réglementaire ? Vers un manque de financements ?

L'introduction de technologies avancées de traitements des micropolluants présents dans les eaux usées, cruciale pour protéger la santé publique et l'environnement, représente ainsi un défi financier pour les collectivités. Cela relève l'importance de bénéficier de sources de financements adéquates. La REP proposée par la DERU en fait partie. Il sera nécessaire d'évaluer, au moment des travaux de transposition de la directive en droit français, le besoin global de financement des traitements quaternaires et d'évaluer en regard la manière dont ce produit financier contribuera à l'effort demandé aux collectivités.

Cependant, et comme précisé au point 1.4, la DERU n'introduit pas seulement une nécessité d'installer des traitements quaternaires. Afin de s'aligner avec les objectifs de neutralité carbone inscrits dans le « Pacte Vert » européen, elle vise la **neutralité énergétique sur l'ensemble des systèmes d'assainissement** de plus de 10 000 EH. Concrètement cette obligation est définie comme l'ensemble de l'énergie produite à partir de sources renouvelables par les STEU (sur et hors-site) et qui compense l'énergie annuelle totale utilisée par ces mêmes stations. Il s'agit ici d'un objectif global au niveau national et non individualisé à chaque système d'assainissement.

À noter qu'il sera possible d'acheter **jusqu'à 35 % de l'énergie à partir de ressources non-fossiles**, et ce uniquement pour contribuer à l'objectif final, à atteindre d'ici le 31 décembre 2045.

Les collectivités assumeront dans tous les cas le surcoût de fonctionnement parmi lesquels la demande accrue en énergie sera à surveiller (voir suite du document).

AMORCE reste donc attentive à la manière dont ces deux exigences s'imbriqueront à l'occasion des travaux de transposition.

L'avis d'AMORCE : À l'image de la REP sur les produits pharmaceutiques et cosmétiques de la DERU, AMORCE propose d'établir un nouvel objet financier plus large sur les micropolluants. En application du principe du « Pollueur-Payeur », cette contribution financière ciblerait l'ensemble des metteurs sur le marché de produits contenant des substances possiblement toxiques afin de financer les solutions de traitement de ces substances par les services d'eau des collectivités.

→ **Attentive aux évolutions relatives à la DERU et au financement des solutions de traitement des micropolluants mais aussi sur les objectifs énergétique, AMORCE invite ses adhérents à rester connectés à ses réseaux de communications (LAA, NL, communauté, LinkedIn).**

3. Solutions techniques avancées : l'action curative face aux micropolluants

La démarche RSDE permet de caractériser ces substances dans les eaux usées, sur l'ensemble du système d'assainissement (collecte, déversoir d'orage et STEU) et d'identifier leur origine afin de mettre en place des plans d'actions de réduction de ces pollutions. En complément, l'admission d'eaux usées non domestiques dans les ouvrages d'assainissement doit être fait en accord avec les autorisations de déversement des collectivités concernées. Ce droit est révocable par le service assainissement afin de protéger ses structures et limiter la présence de produits jugés toxiques. Cependant, ces mesures seules ne suffisent pas à éliminer complètement les micropolluants, visés par les réglementations actuelles, à venir ou pas encore pris en compte. Pour y parvenir, un traitement supplémentaire doit être installé dans les stations d'épuration. Parmi les procédés disponibles, 3 se dégagent pour traiter les micropolluants :

- L'ozonation
- L'adsorption sur charbon actif,
- La filtration membranaire.

L'efficacité de ces traitements repose sur des études préalables permettant de déterminer les micropolluants à traiter (nature et concentration) et de fixer les objectifs d'abattement. Par exemple, l'ozonation est moins performante pour les métaux lourds, tandis que la filtration membranaire est moins adaptée aux polluants très solubles dans l'eau. Il est donc essentiel d'accompagner la sélection des technologies par une analyse des risques, afin de garantir un traitement à la fois efficace et économiquement viable. Dans ces réflexions, un point d'attention est à mener pour traiter tout ou partie du flux de micropolluants, dans le respect des exigences de qualité attendues.

Pour maintenir une conformité aux normes de qualité, les STEU doivent adapter leurs installations en fonction des innovations technologiques et de la variabilité des micropolluants. Sur les 13 micropolluants prévus dans le cadre de la DERU, le REX Suisse montre que les traitements par charbon actif, par ozonation ou une combinaison des deux sont particulièrement efficaces. En revanche sur d'autres substances dont les résultats des traitements sont moins connus, il faudra peut-être prévoir une mise à jour régulière des équipements, la formation continue du personnel et un investissement dans la recherche et le développement.

3.1 Ozonation

L'ozone (O_3) est particulièrement efficace pour dégrader les composés organiques complexes, y compris les hormones et les médicaments. [L'ozonation](#) génère des radicaux libres qui brisent les liaisons chimiques des polluants, réduisant ainsi leur toxicité. Cependant, ce processus nécessite des contrôles analytiques précis pour éviter la formation de sous-produits potentiellement nocifs.

3.1.1 Principe de fonctionnement

L'ozone est produit à partir d'oxygène (de l'air ou pur) circulant dans un «espace de décharge» sous l'action d'un courant électrique de haute tension (4 à 20kV).

Sur des micropolluants organiques, l'oxydation par l'ozone en phase aqueuse a lieu de deux manières :

- Oxydation directe qui est sélective et concerne principalement les composés aromatiques, les phénols, les amines, les composés soufrés et les structures moléculaires à doubles liaisons carbone/carbone ;

- Oxydation indirecte par l'intermédiaire des radicaux hydroxyles, non sélectifs, qui ont un pouvoir oxydant plus fort et peuvent, de ce fait, dégrader presque tous les types de molécules jusqu'au stade ultime de la minéralisation.

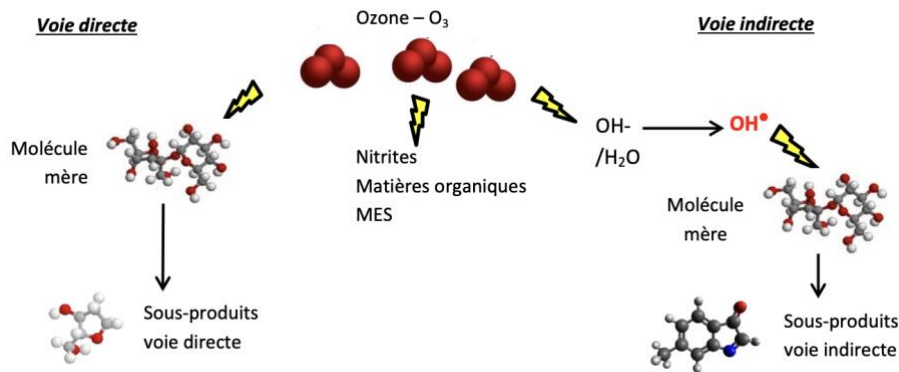


Schéma réactionnel d'oxydation (source : Projet Micropolis)

En traitement des eaux usées, ces deux voies réactionnelles ont lieu simultanément de sorte que la sélectivité de l'attaque de l'ozone moléculaire est utilement complétée par l'action non sélective du radical hydroxyle.

Quelles sont les doses d'ozone à appliquer ?

Lors de l'étude technique de la mise en place d'un procédé avancé d'oxydation, une fois la caractérisation des molécules à traiter réalisée, **il est nécessaire de déterminer avec précision la dose à appliquer, afin d'avoir un traitement efficace et pour éviter les surdoses.**

Le [projet MICROPOLIS](#), de l'appel à projets « Innovation et changement de pratiques – Lutte contre les micropolluants des eaux urbaines », a suivi sur la station de Bouillides (voir retour d'expérience) l'exploitation d'une ozonation. Un des objectifs majeurs de ce projet était d'étudier les mécanismes d'oxydation en fonction des micropolluants à traiter, ainsi que les doses d'ozone les plus pertinentes.

Trois groupes se dégagent, en fonction de la molécule ciblée et de la qualité de l'eau :

Groupe de réactivité	Constante cinétique de second ordre ($L \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$)	Dose d'ozone spécifique corrigée par les nitrites (gO_3/gC) pour atteindre 80% d'élimination par ozonation	Exemples de micropolluants
A – Rapide	$[9,44 \cdot 10^4 - 8,18 \cdot 10^6]$	0,2 - 0,4	carbamazépine, diclofénac, estrone, sulfaméthoxazole
B – Intermédiaire	$[1,3 \cdot 10^3 - 4,9 \cdot 10^3]$	0,6 – 0,7	aténolol, clarithromycine, métoprolol, ofloxacine
C - Lent	$[1,5 - 4,5 \cdot 10^2]$	0,8 – 0,9	diuron, imidaclopride, kétoprofène, acide fénofibrique

Dose d'ozone à appliquer dans le traitement des micropolluants (source : Projet Micropolis)

Nota : Les nitrites et des taux de MES (Matières En Suspension) sont deux paramètres susceptibles d'influencer la consommation d'ozone, du fait d'une compétition entre polluants.

3.1.2 Rendements d'élimination

Le [rapport final](#) du projet MICROPOLIS montre une certaine efficacité de l'ozonation sur les molécules organiques (produits pharmaceutiques, métabolites de pesticides). En revanche, elle n'affectera ni les métaux, ni les alkylphénols, ni les per- et polyfluoroalkylées (PFAS).

L'augmentation des doses d'ozone entraîne une augmentation du rendement d'élimination pour les molécules les plus difficilement oxydables, sans changer ceux sur les molécules déjà oxydées, comme c'est le cas pour la carbamazépine (médicament).

Donc pour des molécules organiques, les rendements d'élimination peuvent atteindre les 80% en moyenne voire plus pour des molécules spécifiques.

A titre d'exemple, l'ozonation appliquée à une dose d'ozone minimale (<5 mg/L) et avec un très faible temps de contact (<3 minutes) parvient à réduire de plus de 98% les concentrations en produits pharmaceutiques (source : ARMISTIQ).

3.1.3 Retours d'expériences

Installation d'un procédé d'ozonation sur la STEU de Bouillides (06)

La STEU des Bouillides (50 000 EH), gérée par le Syndicat Intercommunal pour l'extension et la gestion de la station d'épuration des Bouillides, est une station par biofiltration et qui est équipée d'une installation d'ozonation pour traiter les micropolluants ce qui en fait la seule station française dotée de garantie de traitement sur certains micropolluants de la directive cadre sur l'eau.

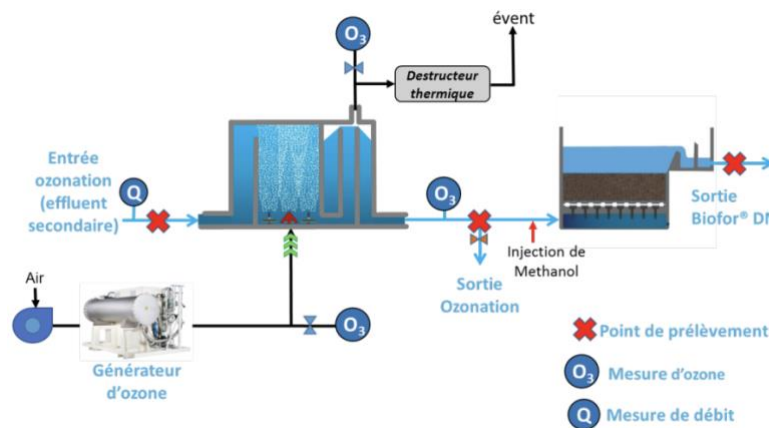


Schéma du système d'ozonation, STEU de Bouillides (Source : [Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse](#))

Financé par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et piloté par l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement) en collaboration avec SUEZ, entre 2013 et 2016, les objectifs principaux du projet étaient :

- Évaluer les performances techniques de l'élimination des micropolluants par ozonation.
- Analyser l'efficacité énergétique du procédé.
- Étudier les impacts environnementaux associés à cette technique.
- Identifier les avantages et inconvénients de l'ozonation en conditions réelles de fonctionnement.

Concernant le procédé, la génération d'ozone est réalisée directement à partir de l'air, meilleur compromis technique (après étude) par rapport à l'utilisation d'oxygène liquide. La dose (5g d'O₃/m³) d'ozone injectée, choisie en fonction des molécules à traiter, est ajustée en fonction du débit de l'effluent secondaire. Sur la station des Bouillides, les rendements d'élimination atteints par l'ozonation sont de l'ordre de 70 à 90% pour les micropolluants organiques analysés (médicaments, pesticides, hormones).

Sur cette station, l'ozonation représente une consommation d'électricité supplémentaire de 650 000 kWh/an, soit 27 % de la consommation totale de la station, deuxième poste le plus consommateur derrière le traitement biologique (33%).

Au moment de la mise en place du procédé (2012) et aux vues de la contrainte d'exploitation supplémentaire sur la station, une augmentation moyenne entre 0,10 et 0,18 €/m³ du prix de l'eau a été nécessaire. Cette dernière prend en compte les coûts liés à l'énergie et à la maintenance, ainsi que l'amortissement des investissements.

Utilisation de l'ozone dans la STEU de Porrentruy (Suisse)

En 2020, la STEU de Porrentruy (20 000 EH), située dans le Canton du Jura en Suisse, a été équipée d'un traitement des micropolluants par ozonation et filtration sur sable. Conformément à la loi fédérale sur la protection des eaux de 2016, ces procédés visent à améliorer les rejets des eaux usées traitées dans le milieu récepteur.

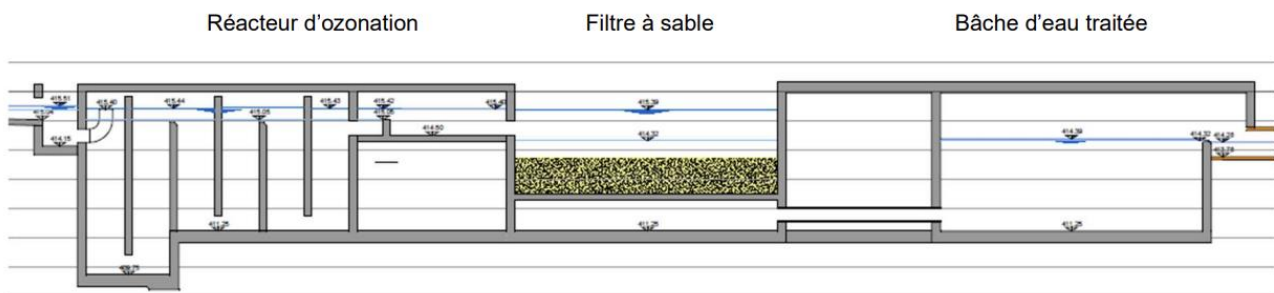


Schéma traitement des micropolluants par ozonation, STEU de Porrentruy (source : micropoll.ch)

L'ozone est généré sur place à partir d'oxygène liquide stocké, puis transformé en oxygène gazeux par évaporation. Il permet de produire un gaz ozoné (7 à 14 % d'ozone) à partir d'un générateur d'ozone d'une capacité de 4,2 kg O₃/h, puis refroidi par un échangeur de chaleur dans les eaux traitées. L'élimination des micropolluants se fait dans un réacteur de contact constitué de trois chambres à contre-courant, suivies de quatre filtres à sable monocouche de 1,25 m de média filtrant. Les résultats montrent une réduction de plus de 80 % des micropolluants à suivre et à traiter au titre de la réglementation suisse.

Le passage de l'eau dans le filtre à sable sert à développer une activité biologique qui dégrade les sous-produits d'oxydation et retient les MES.

3.1.4 Avantages et inconvénients à l'ozonation

Au-delà de la seule nécessité d'étudier et traiter, par ozonation, les micropolluants présents dans les eaux résiduaires arrivant à la station des Bouillides, le projet Micropolis a également permis de mettre en avant plusieurs limites et avantages à l'utilisation de ce procédé.

L'ozonation est une solution efficace pour **traiter une large gamme de micropolluants organiques dissout dans l'eau à traiter**. Solution qui peut se suffire à elle-même selon les substances à traiter, car elle **ne nécessite généralement pas de réactifs supplémentaires**, notamment si l'ozone est produit sur place à partir de l'oxygène de l'air, simplifiant la gestion des substances utilisées et réduit les coûts. Enfin, agissant directement dans l'eau, **le procédé ne génère pas de nouveaux déchets**, en opposition avec des techniques de filtration sur média (type charbon actif).

Pour le suivi des performances de l'ozonation, il repose sur une surveillance régulière des micropolluants cibles, des sous-produits usuels formés (type bromates). La plateforme suisse sur l'action micropolluants a d'ailleurs été amenée à formuler plusieurs [recommandations](#) relatives à l'adéquation du processus d'ozonation. Elle souligne l'importance d'évaluer la compatibilité des eaux usées avec ce traitement avant sa mise en œuvre, notamment via :

1. **Étude du bassin versant** : Analyse des sources potentielles de pollution et identification des rejets industriels ou artisanaux susceptibles d'influencer la composition des eaux usées.
2. **Mesures à l'entrée de l'ozonation** : Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux usées, tels que la concentration en bromures, qui peuvent conduire à la formation de sous-produits indésirables comme les bromates lors de l'ozonation.

3. **Analyses en laboratoire** : Tests spécifiques pour déterminer la formation potentielle de sous-produits d'oxydation problématiques et évaluer l'efficacité de l'ozonation sur l'élimination des micropolluants présents.
4. **Bioessais** : Évaluations écotoxicologiques pour s'assurer que le traitement n'engendre pas d'effets néfastes sur le milieu récepteur.

Cependant, **l'ozonation crée des sous-produits de dégradation qui peuvent avoir des impacts environnementaux potentiellement indésirables.**

De plus, **elle ne présente aucune action sur les métaux, ni sur les molécules plus hydrophobes qui iront se stocker dans les boues**, montrant ainsi une première limite vis-à-vis de l'efficacité du traitement sur un spectre plus grand de micropolluants. Les nitrites et les MES, comme précisé plus haut et au même titre que d'autres matières organiques, sont des paramètres d'influence, susceptibles de rentrer en compétition avec les matières cibles, réduisant donc l'efficacité de l'ozonation. Par ailleurs, **le procédé impose des contraintes pour protéger le personnel exploitant**, l'ozone pouvant être nocif en cas d'inhalation.

Enfin, la consommation énergétique supplémentaire nécessaire pour générer l'ozone est un facteur qui pourrait être limitant considérant le surcoût que cela pourrait entraîner.

Aux vues des limites soulevées, il apparaît que l'ozonation, seule, n'est pas suffisante pour limiter toutes les émissions de micropolluants contaminant les eaux usées. Il semblerait alors utile d'associer ce procédé avec d'autres technologies. Les [études](#) montrent que des couplages ozone/péroxyde d'hydrogène ou ozone/UV permettent d'améliorer les rendements d'élimination pour les substances les moins réactives, c'est le cas pour des pesticides et métabolites tels que l'AMPA (principal produit de dégradation du glyphosate) ou l'atrazine.

3.2 Adsorption sur charbon actif

Généralement **utilisé en tant que procédé d'affinage pour les eaux à destination de la consommation humaine** ou pour des eaux industrielles faiblement chargées, **l'adsorption des micropolluants sur charbon actif présente des taux d'élimination intéressants**. Il convient de l'étudier dans le panel des solutions à envisager pour les STEU.

Voir aussi : Note EAT 21 sur le traitement des métabolites de pesticides et des PFAS en eau potable.

3.2.1 Quelques rappels sur le procédé

Le charbon actif est utilisé pour adsorber une large gamme de micropolluants. Possédant de nombreux pores et donc une surface spécifique très importante, il peut capter efficacement les molécules organiques contenues dans les eaux, comme les résidus médicamenteux et les pesticides. En traitement des eaux, il existe deux types de charbons :

- Le charbon actif en poudre (CAP) : Principalement utilisé en eau potable et en mélange, il est très efficace, son utilisation atteint des rendements d'élimination allant jusqu'à 90% selon les molécules visées. Toutefois, il est à usage limité car il doit être ensuite séparé de l'eau.
- Le charbon actif en grains (CAG) : Solution privilégiée pour le traitement de l'eau potable pour des pollutions chroniques. Il est généralement contenu dans un réacteur au travers duquel l'eau à traiter circule et présente des rendements équivalents au charbon en poudre.

À mesure de son utilisation, le charbon actif se sature en micropolluants et perd en efficacité d'adsorption. **Pour restaurer ses propriétés en vue d'un réemploi, 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 thermique reste celle qui présente le plus d'intérêt quand il est question de micropolluants puisqu'elle permet de détruire les molécules organiques, évitant une nouvelle contamination. À noter que le charbon en poudre n'est pas régénérable.

Pour des substances comme les métabolites de pesticides et les PFAS, il est important de souligner que les charbons doivent être renouvelés à intervalles réguliers (selon les molécules visées, le type de charbon, le flux à traiter).

3.2.2 La contrainte de l'eau usée

Malgré une grande surface spécifique, le charbon actif présente une limitation majeure, à savoir que sur des effluents fortement chargés ce sont les matières organiques (représentées par la DCO) les plus facilement adsorbables qui vont se déposer en priorité dans les pores, pouvant entraîner un colmatage plus rapide des filtres et diminuant de manière significative le pouvoir adsorbant sur des micropolluants ([Nowotny et al.](#), 2007, anglais).

Ce problème se pose particulièrement dans les solutions basées sur des filtres à charbon actif en grains, qui semblent être les moins bien adaptés pour le traitement des eaux usées.

Et, à ce jour, il manque de retours d'expérience fiables en France permettant d'évaluer la pertinence de l'utilisation (éventuel relargage des micropolluants adsorbés) et la durée de vie des matériaux d'adsorption pour l'élimination des micropolluants dans les eaux usées.

3.2.3 Quelles solutions à envisager ?

Des études, bien que limitées dans leur nombre, ont malgré tout montré une utilisation possible des charbons actifs dans les eaux usées. Ceci dans le but de contourner les limitations de colmatage dues à la présence de matières en suspension résiduelles. Pour cela, trois solutions se dégagent :

- Étudier, pour du charbon actif en grain, la possibilité d'un dimensionnement plus important avec une plus grande emprise au sol. Le CAG bénéficiant de la possibilité d'être régénéré.
- Combiner deux solutions : le charbon actif en poudre et une ultrafiltration. [L'étude](#) de Margot et al. (2011) illustre ce couplage de procédé, utilisé sur la STEU de Vidy (Suisse). Pour un dosage de 10 à 20 mg/L de charbon, un rendement de 80% d'élimination était atteint pour les micropolluants étudiés (produits pharmaceutiques). Cependant, les membranes d'ultrafiltration se colmatant trop régulièrement, entraînant un surcoût d'exploitation, elles ont dû être remplacées par un filtre à sable.

Nota : Cette étude a pu aussi montrer que l'utilisation des CAP ne garantit pas un traitement des micropolluants lors de pics de pollution. En effet, ces derniers entraînent une baisse d'efficacité du traitement si le dosage n'est pas réadapté en fonction.

- Utiliser du charbon actif en micro-grains. Le [programme d'innovation du SIAAP](#) a étudié la possibilité de l'utilisation de ce type de charbon, afin d'évaluer l'abattement sur une cinquantaine de micropolluants (pesticides et résidus pharmaceutiques). Le procédé avancé employé est une adsorption sur charbon actif en micrograin en lit fluidisé avec un taux de traitement de 10 g/m³. Les résultats mettent en évidence des réductions significatives de concentration sur certaines molécules limitant l'impact de la STEU sur le milieu récepteur. Plus globalement les rendements d'éliminations sont supérieurs à 60% pour la majorité des micropolluants ciblés.

STEU de Penthaz (Suisse) : Utilisation de Charbon actif en Grains en lit fluidisé

La station d'épuration de Penthaz, dans le canton de Vaud en Suisse, d'une capacité de 15 000 EH traite les micropolluants, conformément à la loi fédérale de 2016 sur la protection des eaux. En effet, depuis 2018, la STEU est équipée d'un procédé d'adsorption par charbon actif en micro-grains en lit fluidisé.

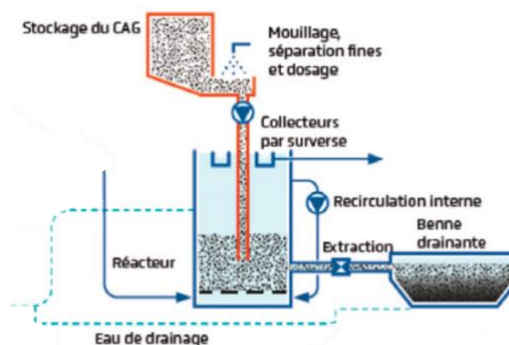


Schéma de principe des éléments de traitement des micropolluants (Source : [micropoll.ch](#), 2021)

Le charbon actif est mis en suspension dans un réacteur de contact alimenté par un flux ascendant d'eau à traiter. L'injection quotidienne de charbon, combinée à des extractions régulières, maintient un âge moyen du

charbon d'environ 350 jours dans les réacteurs. La masse totale de charbon actif en exploitation est de 16,4 tonnes, répartie entre deux réacteurs.

La séparation entre l'eau traitée et le charbon est réalisée gravitairement, ce qui élimine la nécessité de filtration supplémentaire. Les MES sont retenues dans le lit de charbon et éliminées lors de lavages des réacteurs. Ces cycles d'entretien garantissent une hydraulique optimale et un fonctionnement sans colmatage

Au niveau des performances de traitement, le procédé a été optimisé pour fonctionner à un dosage moyen de charbon de 13 g/m³, et sur les 12 molécules suivies et à traiter au titre de la réglementation suisse, les rendements d'élimination atteignent près de **87,9 %**, contre 21 % sans traitement. L'efficacité est mesurée en temps réel par des sondes UV en ligne, qui permettent de corréler l'absorbance à 254 nm à l'élimination des micropolluants.

L'énergie consommée par l'ensemble du traitement des micropolluants est d'environ **0,035 kWh/m³** d'eau traitée.

3.2.4 Avantages et Inconvénient de l'adsorption sur charbon actif

Le charbon actif, qu'il soit utilisé en grain ou en poudre, représente une technologie éprouvée et efficace pour l'élimination des micropolluants, notamment les résidus pharmaceutiques. Le CAG offre **un bon rapport coût/efficacité grâce à sa large surface spécifique et sa capacité à traiter une variété de micropolluants organiques**. En revanche, **son efficacité sur des pollutions plus spécifiques comme les PFAS reste variable**, car selon les molécules ciblées et leur concentration, une saturation rapide nécessitant une régénération ou un remplacement de média peut avoir lieu, augmentant de fait les coûts d'exploitation. Dans le traitement des eaux usées, le CAP se distingue par sa flexibilité d'utilisation, utilisé ponctuellement sur une contamination spécifique ou en première phase d'adsorption pour prolonger la durée de vie d'un filtre à CAG. En usage exclusif, il peut être couplé à une filtration sur membrane ou une ozonation, permettant une action à spectre plus large.

À noter toutefois que **la performance du charbon actif décroît lorsque le Carbone Organique Total augmente, en raison de la compétition pour les sites d'adsorption**. Cette performance peut être améliorée en intégrant des filtres en série ou en optimisant le temps de contact hydraulique, élément garantissant l'efficacité. Par ailleurs, le charbon actif ne dispose pas d'indicateurs simples pour détecter la saturation. Cela impose des **contrôles analytiques réguliers sur les substances cibles en sortie de filtre**, mais également un suivi fréquent de paramètres tels que l'absorbance UV254, qui permet de surveiller la saturation progressive. La conductivité peut également être utilisée pour détecter des variations dans les concentrations de substances dissoutes. Le suivi du temps de contact à lit vide, combiné à un contrôle des matières en suspension et des pertes de charge dans les filtres, permettent de maintenir un fonctionnement optimal. Enfin, un renouvellement planifié du charbon en fonction du volume d'eaux traitées permet de garantir une efficacité constante tout en maîtrisant les coûts d'exploitation.

3.3 Filtration membranaire

La filtration membranaire est un procédé de séparation physique en phase aqueuse qui repose sur le principe de perméation au travers une membrane. C'est-à-dire, que le média, poreux, opposera une résistance au passage de certaines substances jugées indésirables. Les membranes, en tant que barrières physiques à base de céramique ou de polymères organiques, sont utilisées pour de nombreuses applications, notamment dans le traitement de l'eau potable ou dans le traitement d'eaux industrielles peu chargées.

Concrètement, 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 traitée passant à travers la membrane.
- Le concentrat, qui contient l'ensemble des sels et matières polluantes retenus par la membrane. C'est un effluent chargé qui doit être éliminé.

En traitement des eaux, ce procédé remplit deux objectifs distincts :

- Retirer les MES, servant ainsi de prétraitement pour optimiser les procédés de traitement en aval.
- Éliminer certains micropolluants, dissouts ou précipités.

Les capacités de traitement de la filtration membranaire vont de la clarification à la désinfection. Et, en fonction de la finesse de filtration attendue, donc de la taille des molécules à retenir, il existe plusieurs types de membranes :

- Microfiltration ;
- Ultrafiltration ;
- Nanofiltration ;
- Osmose inverse.

Cependant, il demeure une grande variabilité dans l'efficacité du traitement des micropolluants entre d'un côté les membranes fonctionnant à « basse pression » (micro et ultrafiltration) et celles fonctionnant à « haute pression » (osmose inverse et nanofiltration). Les études bibliographiques montrant de meilleurs rendements pour les membranes fonctionnant à haute pression.

3.3.1 Membranes « basse pression »

Les procédés membranaires basse pression sont économiquement avantageux car ils consomment peu d'énergie. De plus, la maîtrise et l'optimisation de leur fonctionnement permettent aux membranes d'avoir une durée de vie accrue.

Toutefois, dans le cas du traitement des micropolluants, elles font plus généralement office de pré-traitement à des procédés plus poussés. Le programme d'études ARMISTIQ souligne que la microfiltration n'abat que peu voire pas les micropolluants dissous. Le procédé limitant seulement le passage de MES, donc des micropolluants potentiellement adsorbés dessus. Tandis que l'ultrafiltration semble être plus performante, tout en affichant des résultats variables dépendant de nombreux facteurs dont les caractéristiques des filtres, de l'eau à traiter et des concentrations d'entrée des micropolluants.

L'étude « Élimination de micropolluants prioritaires et émergents des eaux résiduaires urbaines par les bioréacteurs à membranes (BRM) immergées » de l'INRAE, financé par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse s'est intéressée à l'efficacité de ce procédé.

Portant sur 24 métaux et 66 substances organiques (HAP, alkylphénols, pesticides, substances pharmaceutiques et hormones), l'étude a mis en évidence une bonne efficacité sur les substances inorganiques et quelques médicaments, de l'ordre de 70 à 90% d'élimination par piégeage de MES. En revanche, la majorité des substances médicamenteuses et les micropolluants organiques n'ont été que partiellement éliminés, environ 30%. Comparativement à une station à boues activées, les BRM n'améliorent pas significativement l'élimination pour près de 50% des substances, principalement les pharmaceutiques (dont ceux visés par la future DERU).

L'étude conclut que pour entraîner efficacement une diminution des concentrations des micropolluants non adsorbables dans les eaux usées, ce sont des actions de réduction à la source ou la mise en place de traitement complémentaire qui sont nécessaires. L'efficacité venant de la combinaison de traitements d'affinage.

3.3.2 Membranes « haute pression »

En tant que procédé unitaire, seules les membranes de nanofiltration ou d'osmose inverse peuvent assurer un traitement des micropolluants suffisant, grâce à leur taille de pore extrêmement faible induisant une sélectivité plus large dans les substances à retenir.

Particulièrement efficaces pour éliminer les métaux lourds et la plupart des composés pharmaceutiques, elles présentent des rendements d'élimination proche des 90 voire des 95%, en eau potable. Cependant, en fonctionnant à haute pression, ces technologies ont des coûts élevés, tant en investissement qu'en fonctionnement. Et leur consommation importante d'énergie pourrait représenter un frein non négligeable à leur utilisation.

Appliquées au traitement des micropolluants dans les eaux usées et selon les contraintes de fonctionnement, la nanofiltration serait le meilleur compromis par rapport à l'osmose inverse.

Toutefois, l'efficacité de la technologie reste à moduler en fonction de nombreux paramètres d'entrée :

- Propriétés de la membrane (porosité, charge membranaire...),
- Caractéristiques des polluants à filtrer (poids moléculaire, taille, charge électrique...)

- Caractéristiques physico-chimiques des effluents (pH, présence des substances organiques ou inorganiques...)

Il reste également les défis posés par le colmatage, la gestion des eaux de lavage et des concentrats.

À ce jour, il n'existe pas de retour d'expérience de collectivité permettant d'étudier concrètement l'utilisation de cette technologie. Cependant, en se basant sur ceux existants en eau potable, il semble possible d'affirmer que, au travers d'études préalables, en fonction de la qualité de l'eau entrante, **la nanofiltration est une solution à envisager tout en prenant en compte le besoin d'atténuer/prévenir le colmatage** (prétraitement, lavages récurrents, ...).

Ce qui montre, encore une fois, que pour traiter efficacement les micropolluants en STEU, c'est le couplage de technologies avancées qui est le plus pertinent (Nanofiltration/Ozonation, Ultrafiltration/Nanofiltration, Charbon Actif/Ozonation). Le modèle suisse orientant plutôt vers un couplage charbon et ozonation plutôt qu'avec des procédés uniquement basés sur de la nanofiltration. En effet, le document « [Micropolluants dans les eaux usées urbaines](#) » revient sur ces questions, indiquant l'utilisation de la nanofiltration ou de l'osmose inverse comme non rentable pour les eaux usées urbaines, du fait de la part importante d'eau traitée composant le concentrat (jusqu'à 25%) et qui doit être géré.

3.3.3 Avantages et Inconvénients à la filtration membranaire

En termes d'efficacité, la nanofiltration présente un haut niveau de rétention pour la plupart des micropolluants, notamment les plus hydrophiles comme les PFAS. Et à l'inverse du charbon actif, le procédé ne dépend pas de phénomènes d'adsorption, mais d'un mécanisme physique basé sur la taille des pores membranaires et la réjection des composés dissous. Cette indépendance vis-à-vis de la saturation des matériaux confère à la nanofiltration une stabilité de performance à plus long terme.

Cependant, en assainissement, l'utilisation de la nanofiltration présente certaines limites. La sensibilité des membranes à l'encrassement biologique, au colmatage par les MES ou par les matières organiques dissoutes nécessite un prétraitement, souvent par coagulation, soit par des filtrations à pores plus larges (micro ou ultrafiltration), pour garantir la stabilité du fonctionnement. Par ailleurs, la production de concentrats riches en micropolluants pose un défi de gestion majeur, puisque cela implique des coûts supplémentaires sur près d'un quart du volume traité, notamment lorsqu'il s'agit de retraiter une partie de ce flux par retour en tête.

Sur le suivi des performances, au-delà des contrôles analytiques ponctuels ciblant les micropolluants, plusieurs paramètres doivent être surveillés régulièrement pour garantir une exploitation optimale. La pression transmembranaire est un indicateur clé pour détecter les phénomènes de colmatage ou d'encrassement, tandis que le suivi de la conductivité permet de vérifier l'intégrité des membranes et l'efficacité globale du rejet et des micropolluants. Le flux membranaire évalue aussi l'efficacité du système. Une surveillance continue de ces paramètres permet d'optimiser les cycles de retrolavage et de nettoyage chimique pour prolonger la durée de vie des membranes.

CONCLUSIONS

Pour les collectivités territoriales, une gestion efficace des micropolluants présents dans les eaux usées nécessite une approche globale et concertée, impliquant l'ensemble des acteurs économiques, les usagers, et les pouvoirs publics.

Du fait de la complexité de ces substances, de leur pluralité et leur comportement dans les matrices environnementales, une des priorités est donnée au déploiement de solutions curatives adaptées. Il s'agit là de procédés avancés comme l'oxydation, l'adsorption sur charbon actif et la filtration membranaire, jugés efficaces sur de nombreux polluants. Toutefois leur mise en place et fonctionnement nécessitent des coûts d'investissement et d'exploitation souvent lourds. En particulier lorsqu'il est préconisé de coupler les technologies curatives pour être efficace sur un large spectre de molécules à traiter.

Les solutions de financement doivent être étudiées dès les travaux de transcription de la directive européenne en droit français de manière à minimiser le risque de répercussions sur l'utilisateur via une augmentation des prix de l'eau. AMORCE s'attachera à porter la parole de ses adhérents.

Dans les actions de lutte contre les micropolluants, les solutions curatives ne peuvent se substituer à l'approche préventive de réduction à la source. Sensibilisation des acteurs économiques (entreprises, industries...), des agriculteurs, des établissements publics et des usagers, aides à la substitution pour des substances pas ou moins toxiques, En parallèle d'actions réglementaires fortes (interdiction de substances via REACH, plan « Zéro Pollutions »), pour ou par les collectivités, il conviendra d'étudier l'ensemble des leviers d'actions de réduction à la source des substances toxiques, mais aussi d'agir sur des contaminations plus historiques.

Dans le stade actuel, la surveillance de l'occurrence des micropolluants en STEU reste essentielle pour préparer l'action notamment face aux pollutions dites émergentes.

C'est avec une approche holistique que la problématique des micropolluants pourra être gérée. Et c'est par une prise de conscience collective, accompagnée de changements de pratiques à grande échelle et d'interdiction de l'usage de certaines substances que la qualité des eaux et des milieux pourra être assurée.

Adhérez à AMORCE et participez aux échanges de son réseau

Pour aller plus loin

#79

AMORCE

Lettre aux Adhérents



Consultez nos précédentes publications

- Lettre aux Adhérents [#81](#), Dossier Eau sur les PFAS, AMORCE 2024.
- [EAT 21](#) – Traitement des PFAS et métabolites de pesticides dans l'eau potable, AMORCE 2024.

Consultez nos événements 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, Jérémy 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 22/22

www.amorce.asso.fr -  @AMORCE

