



**THEME 2 : DIAGNOSTIC ET OPTIMISATION DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT VIS-A-VIS DES POLLUANTS ET DES MICROPOLLUANTS**

**ACTION R2.5 : TRAITEMENT TERTIAIRE EN STATION D'EPURATION : PROCEDES D'OXYDATION DES ERU**

## **CONTEXTE**

---

Le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU), en partenariat avec le Service Public de l'Assainissement Francilien (SIAAP) a initié dès la phase 3 d'OPUR des travaux visant à améliorer les connaissances sur le comportement des polluants prioritaires et d'autres substances le long des filières de traitement des eaux résiduaires urbaines. Les travaux menés durant la phase 4 du programme OPUR (2012-2018) se sont intéressés à l'échelle d'un pilote industriel à l'élimination de nombreux micropolluants prioritaires et émergents par charbon actif (thèse R. Mailler, 2012-2015). Par la suite, les travaux sur ce pilote industriel ont été approfondis et le couplage ozonation/charbon actif a été étudié (thèse R. Guillossou, 2016-2019).

Dans la continuité des travaux précédents, cette action portera sur l'élimination des micropolluants en traitement tertiaire des eaux usées selon plusieurs procédés d'oxydation : ozonation, photolyse UV, peracides (acide performique en particulier) et couplages O3 ou UV et réactifs (oxydation avancée). L'utilisation de procédés d'oxydation s'inscrit dans le contexte de la désinfection des rejets de station d'épuration pour améliorer la qualité de l'eau en Seine, en particulier pour la baignabilité (ex. épreuves des JO 2024).

## **OBJECTIFS**

---

Le premier objectif sera de comparer les limites et performances de différents procédés vis-à-vis de l'élimination des micropolluants (avec un focus sur les produits pharmaceutiques) et de l'évolution des paramètres globaux (ex. COD, absorbance UV à 254 nm). Les procédés principalement étudiés seront l'ozonation, la photolyse UV et l'acide performique, ainsi que des couplages (en particulier avec le peroxyde d'hydrogène H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Les résultats seront mis en perspective avec les résultats obtenus dans les travaux antérieurs sur les procédés par adsorption sur charbon actif. Un volet sera dédié aux performances de ces procédés vis-à-vis de la désinfection (bactéries indicatrices de pollution fécale et autres pathogènes). Une des originalités de ce projet est d'étudier l'efficacité de ces procédés d'oxydation sur matrices réelles et ce pour un large panel de polluants.

Les travaux viseront à comparer différents types de qualité d'eau (ex. rejets issus de différentes filières de traitement ou effluents prélevés à différentes étapes d'une même filière) vis-à-vis de l'efficacité des procédés (ex. doses nécessaires à l'élimination des micropolluants) et de la formation potentielle de sous-produits d'oxydation. En lien avec la formation de ces sous-produits, l'accent sera mis sur la caractérisation de l'évolution de la toxicité au cours de ces traitements, évaluée au moyen de bio-essais. Les procédés d'oxydation sont en effet à l'origine de la formation de nombreux sous-produits d'oxydation souvent toxiques ou cancérigènes. En particulier, en présence de certains précurseurs tels que les ions bromure ou des molécules organiques contenant des groupements tels que des amines secondaires ou tertiaires, l'ozonation des eaux usées peut entraîner respectivement la formation d'ions bromate et de nitrosamines, espèces chimiques connues pour leur carcinogénicité élevée.

Afin de caractériser les processus mis en jeu lors des procédés d'oxydation et l'évolution des micropolluants organiques et de leurs sous-produits de dégradation, les outils développés dans l'action de recherche R2.6 (screening qualitatif et écotoxicologie) seront mis en œuvre.

## METHODOLOGIE ET PLANNING

---

Cette action comportera quatre blocs d'étude :

### 1. Performances de traitement

- Génie des procédés : performances de désinfection et d'élimination des micropolluants en fonction des doses d'oxydants et temps de contacts utilisés (Ct) ; du temps de séjour hydraulique et des doses transférées.
- Etude de différents couplages pour l'oxydation avancée (ex. O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).
- Les analyses suivantes seront réalisées : paramètres globaux, micropolluants organiques (ex. produits pharmaceutiques déjà suivis lors des précédentes phases d'OPUR), bactéries fécales et autres pathogènes.
- Expérimentations sur pilote alimenté en continu par les effluents à traiter issus de la station de Seine Centre (hall d'essai SIAAP). Le pilote, déjà utilisé dans la phase 4 d'OPUR, est principalement un pilote d'ozonation mais est équipé d'une lampe UV en sortie permettant des expériences de photolyse/désinfection UV, et permet également l'injection de réactifs (ex. acide performique).
- Expérimentations en batch (LEESU) pour l'étude de certains paramètres (ex. influence de la dose d'oxydants ou de la concentration en matière organique ou en MES), de réactifs particuliers (ex. influence de la concentration en ions nitrite sur les sous-produits azotés ou en ions bromure sur les ions bromate) ou encore sur des molécules d'intérêt (ex. étude fine de mécanismes de dégradation). Le LEESU s'est doté en 2018-2019 de plusieurs pilotes de laboratoire (ozonation et photolyse UV) permettant l'étude à petite échelle (mode batch) des procédés d'oxydation dans des conditions contrôlées.

### 2. Influence de la qualité de la matrice

- Comparaison des qualités des rejets issus de différentes filières d'épurations (SEC, SAM, SEM, SAV) vis-à-vis des performances des procédés d'oxydation.
- Comparaison de différentes matrices issues des étapes de traitement et de leur impact sur l'élimination des micropolluants organiques (eau décantée, eau décarbonée, eau nitrifiée, rejet)
- Influence du temps de pluie et des conditions dégradées en station d'épuration (SEC).
- Dopages et dilutions d'effluents pour faire varier certains paramètres globaux (MES, matière organique dissoute...) et leur impact sur les procédés.

### 3. Sous-produits et toxicité

- Etude de la formation de sous-produits d'oxydation : analyses ciblées de nitrosamines, bromate, sous-produits halogénés (trihalométhane, haloacétonitriles, haloacétamides) formés après oxydation en présence d'ions bromure dans les eaux usées
- Caractérisation par screening non-ciblé en spectrométrie de masse haute résolution (cf *action T1*) pour l'identification des sous-produits de dégradation des micropolluants et des mécanismes d'oxydation en œuvre dans les différents procédés.
- Caractérisation des familles de molécules les mieux dégradées et des familles plus persistantes.

- Caractérisation de l'évolution de la toxicité des effluents au cours des traitements et comparaison des différents procédés. Les bio-essais employés seront ceux utilisés par le SIAAP ou encore les tests de toxicité employés dans l'*action T1*.
4. Caractérisation fine des familles de micropolluants organiques et des mécanismes réactionnels
- Pour une sélection de procédés (en particulier l'ozonation), une caractérisation fine des polluants organiques sera menée dans le cadre du projet associé *WaterOmics* (thèse en cours 2018-2021). L'objectif est de caractériser différentes fractions obtenues à partir d'extractions sur de multiples cartouches ou résines, permettant de séparer des familles de molécules en fonction de leurs propriétés physico-chimiques (polarité, taille). Chaque fraction sera ensuite analysée en spectrométrie de masse haute résolution et avec les tests de toxicité utilisés dans l'*action T1*. La répartition des molécules organiques entre les différentes fractions sera comparée au cours des traitements par oxydation pour déterminer les tendances à l'œuvre dans les processus de dégradation (ex. formation de molécules plus polaires et persistantes ?).
  - Pour certaines molécules ou familles de micropolluants d'intérêt identifiées par screening qualitatif, des expérimentations en conditions contrôlées seront menées pour déterminer les mécanismes réactionnels menant à la formation ou dégradation de ces polluants.

## RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEES

---

Les aspects novateurs de cette action résident dans :

- Le couplage des méthodes de caractérisation (analyse quantitative ciblée de micropolluants, analyse ciblée de sous-produits d'oxydation, screening non ciblé et écotoxicologie).
- La diversité de matrices et qualités d'effluents étudiés et l'utilisation de matrices réelles.
- La diversité des procédés d'oxydation étudiés et l'étude en continu des procédés sur effluent issu directement de la station d'épuration.

Les résultats obtenus permettront l'élaboration d'une stratégie de traitement tertiaire des eaux usées pour limiter l'impact des rejets sur la qualité des eaux du point de vue sanitaire (désinfection pour la baignade) et environnemental (élimination des micropolluants, limitation de la toxicité et de potentiels sous-produits formés).

## CONTACTS

---

Johnny Gasperi : johnny.gasperi@u-pec.fr  
Julien Le Roux : julien.le-roux@u-pec.fr