



OBJECTIFS ET STRUCTURE DE L'OBSERVATOIRE OPUR

OPUR est un programme de recherche pérenne dans le domaine de l'hydrologie urbaine qui s'appuie sur une infrastructure d'observation lourde et sur un partenariat privilégié entre les chercheurs et les acteurs opérationnels de l'eau et de l'assainissement en Île de France. Il vise une meilleure connaissance des flux d'eau et de contaminants en milieu urbain, depuis leur source jusqu'à leur rejet dans les milieux récepteurs en prenant en compte les ouvrages de gestion. Ces recherches, de nature interdisciplinaire, associent sciences physiques, chimiques, biologiques, de l'ingénieur et sciences humaines et sociales au sein d'OPUR. Elles s'appuient sur l'expérimentation et la modélisation à différentes échelles. Des données, ponctuelles ou à haute fréquence sont acquises sur des dispositifs lourds d'expérimentation. Les données et les connaissances acquises servent au développement d'outils d'aide à la gestion des eaux et des polluants en milieu urbain.

OPUR est développé et géré par le LEESU depuis 1994. Il est structuré en phases de recherche successives d'une durée moyenne entre cinq et six ans. Les recherches menées tiennent compte des changements multiples (urbanisme et architecture, réglementation, pratiques et usages, modes de gestion) et analysent la résilience des infrastructures de gestion des eaux urbaines à ces changements (ouvrages de gestion des eaux pluviales, ouvrages de dépollution, réseaux). Des efforts particuliers portent sur l'évaluation et la promotion de concepts et solutions innovants permettant d'atténuer les effets de ces changements multiples et de contribuer sur le volet de la gestion des eaux à l'émergence de systèmes urbains à faible empreinte environnementale.

OPUR est membre fondateur du réseau d'observatoires français en hydrologie urbaine URBIS qui regroupe, en plus d'OPUR, l'OTHU à Lyon et l'ONEVU à Nantes. Ce réseau a été labellisé Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche (SOERE) en Environnement pour la période 2011-2015. La mise en place de ce réseau permet d'asseoir et de pérenniser un réseau d'observatoires en hydrologie urbaine en renforçant les thématiques transverses, en coordonnant les efforts d'observations de manière à les rendre comparables ou complémentaires, et en développant les projets de recherche collaboratifs.

OPUR est membre de la zone atelier (ZA) Seine qui a été créé en 2000 à partir du programme PIREN-Seine. Le domaine couvert par cette ZA a été étendu en 2015 à tout le bassin de la Seine en tirant parti d'un rapprochement avec le GIP Seine-Aval qui travaille sur l'estuaire et avec OPUR pour renforcer le potentiel de recherche dans le domaine urbain, et mieux intégrer les aspects urbains dans les travaux menés au sein de la ZA. L'élargissement de la ZA Seine permet d'atteindre deux objectifs : Le premier concerne l'élargissement des compétences, et le partage/utilisation des expériences acquises par les trois programmes de recherche développés dans le bassin de la Seine. Le deuxième objectif vise à une meilleure intégration amont-aval en allant jusqu'au milieu côtier à l'heure où la DCSMM (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin) et les compétences élargies des agences de l'eau amène à une gestion plus intégrée à l'échelle des bassins versants, y compris les zones côtières.

Les résultats et les enseignements tirés des quatre premières phases (1994-2018) d'OPUR ont pour la plupart, un caractère appliqué et sont très utiles pour les gestionnaires en charge de l'assainissement. De manière générale OPUR a permis d'atteindre trois objectifs :

Amélioration de la connaissance sur la production et le transfert des polluants dans les systèmes urbains : L'étude des polluants en milieux urbains (macro-polluants, micropolluants, bactéries fécales et pathogènes, virus), intégrant leur émission dans l'environnement urbain, leur introduction et transport dans les ouvrages de gestion, jusque leur introduction dans le milieu naturel est au cœur du programme OPUR. Cette approche globalisante a permis de constituer une base de données riche sur les contaminants dans les eaux urbaines. Ces données ont été exploitées pour évaluer les contributions relatives des différentes sources au réseau d'assainissement et pour évaluer la pression de milieux urbains sur les milieux récepteurs. Ces bilans sont indispensables pour évaluer l'efficacité des différents leviers susceptibles d'être activés pour, à termes, réduire les flux de polluants apportés au milieu. Les résultats d'OPUR ont permis également, d'une part, de caractériser les émissions dans les eaux usées domestiques et celles issues des surfaces urbaines suivant les matériaux utilisés et les pratiques d'entretien et, d'autre part, d'étudier le lien existant entre l'occupation des sols et la contamination en micropolluants des eaux urbaines.

Evaluation de dispositifs techniques et concepts innovants de gestion des eaux urbaines : Les actions menées ont permis d'une part d'améliorer les connaissances sur les performances des ouvrages de gestion de gestion amont (ouvrages de rétention, filtration et infiltration du ruissellement) et des ouvrages de gestion centralisés (stations d'épuration des eaux usées, ouvrages de dépollution des eaux pluviales), et d'autre part d'analyser les potentiels et risques associés aux nouvelles ressources en eau (eaux grises, eaux non potables, eau de pluie) et circuits courts. Le rôle des différents acteurs a été pris en compte au travers de l'analyse des pratiques et de l'examen des processus d'alerte, d'innovation et d'appropriation des nouveaux concepts techniques

Développement d'outils de gestion : OPUR développe des outils d'aide à la gestion des flux d'eau et de contaminants dans les eaux urbaines. Ces outils prennent plusieurs formes : (1) Méthodes analytiques pour analyser les micropolluants organiques sur des matrices complexes ; (2) Méthodes innovantes de suivi de la qualité des eaux urbaines (échantillonneurs passifs, screening qualitatif, mesure en continu des contaminants, méthodes d'évaluation de la toxicité, ...) ; (3) Modèles de calcul des flux polluants par temps de pluie ; (4) Méthodes de conception et de dimensionnement des ouvrages de gestion.

En conclusion, OPUR est un outil de structuration de l'expertise scientifique dans le domaine de l'hydrologie urbaine. Il réussit à fédérer des équipes de chercheurs, exerçant dans des disciplines scientifiques complémentaires, autour d'un objet d'étude commun, ici le cycle urbain des eaux. La cohérence et la complémentarité des actions de recherche engagées dans ce programme permettent d'obtenir une vision globale du fonctionnement du système de gestion des eaux urbaines, vision indispensable pour orienter les politiques d'aménagement en Île de France. La réussite d'OPUR repose sur un partenariat solide et durable entre les acteurs scientifiques et les acteurs institutionnels. Des efforts importants ont été déployés pour acquérir un langage commun et pour mettre en place de véritables plateformes de communication. L'appropriation des résultats de la recherche et des outils développés par les acteurs publics et privés conduit à une amélioration des pratiques de conception, de dimensionnement et de gestion des systèmes urbains et au déploiement de nouveaux concepts d'intégration des eaux dans l'espace urbain. Enfin les recherches d'OPUR contribuent pour ce qui concerne la gestion des eaux urbaines à l'émergence de la ville de demain qui sera une ville intelligente, résiliente et à faible empreinte environnementale.

La phase 5 d'OPUR qui s'étend sur la période 2019 – 2023, s'inscrit dans la continuité des travaux menés dans OPUR sur la génération, le transfert et la gestion des flux d'eau et de contaminants dans les eaux urbaines. Elle sera organisée en trois blocs complémentaires : bloc « recherche », bloc « observation pérenne » et bloc « valorisation » (Tableau 1).

1. Bloc recherche, organisé autour de 4 thèmes :

Le thème 1 répond à une demande sociale et politique forte d'organiser des activités récréatives et sportives dans les milieux aquatiques de la région parisienne. Le but de ce thème est de caractériser la contribution des différents types de sources diffuses et ponctuelles de pathogènes d'origine hydrique et de bactéries résistantes aux antibiotiques, afin de mieux évaluer et prédire les risques. Ceci nécessite non seulement d'acquérir de la connaissance sur les niveaux et la nature de la contamination dans différents types de rejets, mais aussi de développer des outils de suivi et de prédiction par modélisation statistique et déterministe. Pour ce faire différents sites de prélèvement sur des petits bassins d'apport de rejets en Marne, en Seine, ou sur le canal de l'Ourcq seront échantillonnés. Le Bassin de la Villette sera utilisé comme site modèle pour développer à l'aide d'un modèle hydrodynamique une approche de prédiction et de hiérarchisation des flux apportés par les sources de contamination. Deux actions seront menées (i) Action R1.1 : Sources et flux et (ii) Action R1.2 : Modélisation du bassin de la Villette. Des études récentes ont suggéré que les virus entériques (surtout les *Adenovirus*, *Rotavirus* et *Noroviruses*), *Campylobacter* spp., *Cryptosporidium* et *Giardia* sont les agents étiologiques d'intérêt majeur pour le nageur. De plus plusieurs cas d'infection par des leptospires lors de compétitions de triathlon ont pu être constatés en Europe. Enfin l'émergence ces dernières années de bactéries multirésistantes aux antibiotiques (notamment via les rejets hospitaliers) représente un enjeu majeur pour l'Organisation Mondiale de la Santé et l'ANSES. Le projet portera donc sur cet ensemble de pathogènes, les *Escherichia coli* résistantes aux antibiotiques, les indicateurs de contamination fécale réglementaires et ceux plus spécifiques de certaines sources humaines et animales.

Le thème 2 traite le diagnostic et l'optimisation des systèmes d'assainissement vis-à-vis des polluants et des micropolluants. Il est structuré autour de deux volets que sont le diagnostic des ouvrages d'assainissement et l'optimisation de leur exploitation.

Les recherches menées dans les quatre premières phases d'OPUR (1994-2018) ont permis de poser un premier « diagnostic » sur le fonctionnement des systèmes d'assainissement. Après avoir étudié la macropollution (phases 1 et 2), les polluants prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau et certains polluants comme les polybromodiphenylethers ou les alkylphénols (phases 3 et 4), La phase 5 d'OPUR vise à élargir les actions de recherche à d'autres polluants émergents et à des nouvelles substances d'intérêt au sein des réseaux d'assainissement et le long du continuum urbain (des émissions aux rejets dans le milieu naturel).

Quatre actions relatives au diagnostic ont été identifiées :

- Action R2.1 : Microplastiques dans les bassins versants anthropisés
- Action R2.2 : Inventaire et valorisation de données débit-qualité d'autosurveillance en entrée de station d'épuration
- Action R2.3 : Polluants émergents dans le continuum urbain
- Action R2.6 : Nouvelles méthodes de caractérisation des micropolluants : Analyse par screening qualitatif et écotoxicologie

Ces actions permettront de mieux connaître la variabilité des concentrations et des flux de macropollution et des relations entre qualité des eaux usées et débit (R2.2), mais également d'apporter des connaissances sur les flux de débris plastiques (R2.1) et de polluants émergents (R2.3) à l'échelle de l'agglomération parisienne par temps sec et par temps de pluie pour identifier des leviers d'actions conduisant à leur réduction. L'action R2.6 permettra de développer de

nouvelles méthodes de caractérisation qui seront appliquées aux différents types d'eaux urbaines étudiées. L'originalité dans cette phase est de proposer une réflexion partagée entre chercheurs et opérationnels pour l'identification de nouvelles substances d'intérêt.

Thèmes (Animateurs)	Actions de recherche
Bloc « Recherche »	
Thème R1 : Qualité microbiologique (Animateurs : Françoise Lucas et Brigitte Vinçon Leité)	Action R1.1 : Sources et flux de pathogènes dans les rejets pluviaux Action R1.2 : Modélisation du bassin de la villette
Thème R2 : Diagnostic et optimisation des systèmes d'assainissement vis-à-vis des polluants et des micropolluants (Animateurs : Johnny Gasperi et Julien Le Roux)	Action R2.1 : Microplastiques dans les bassins versants anthropisés Action R2.2 : Inventaire et valorisation de données débit-qualité d'autosurveillance en entrée de station d'épuration Action R2.3 : Polluants émergents dans le continuum urbain Action R2.4 : Modélisation des flux de matières dans le réseau d'assainissement du SIAAP Action R2.5 : Traitement tertiaire en station d'épuration : Procédés d'oxydation des ERU Action R2.6 : Nouvelle méthode de caractérisation des micropolluants : Analyse par screening qualitatif et écotoxicologie
Thème R3 : Gestion à la source des eaux pluviales (Animateurs : Marie-Christine Gromaire et Jérémie Sage)	Action R3.1 : Modélisation de l'évapotranspiration à différentes échelles spatiales Action R3.2 : Performance hydrologique des jardins de pluie : mesures en conditions contrôlées et modélisation pour une diversité de contextes Action R3.3 : Evaluation de la performance hydrologique des « Arbres de pluie » Action R3.4 : Devenir des micropolluants piégés dans les substrats : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants organiques Action R3.5 : Analyse des dynamiques temporelles au niveau d'un ouvrage de biorétention
Thème R4 : Scénarisation de la gestion des eaux pluviales urbaines dans un contexte de changements globaux (Animateurs : Ghassan Chebbo et Katia Chancibault)	Action R4.1 : Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier Action R4.2 : Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain Action R4.3 : Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur Action R4.4 : Modélisation de l'émission des polluants à l'échelle urbaine Action R4.5 : Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie-Pollution-Climat Urbain »
Bloc « Observation pérenne »	
Thème O1 : Observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales (Animateur : Marie-Christine Gromaire)	
Thème O2 : Observatoire des micropolluants dans les eaux urbaines (Animateur : Régis Moilleron et Jérémie Jacob)	
Bloc « Diffusion des connaissances » (Animateur : Ghassan Chebbo)	
Thème D1 : Communication sur OPUR	Site internet, Lettre d'information, Fiches « résultats phares », Ouvrage sur OPUR, ...
Thème D2 : Communication scientifique et technico-scientifique	-Articles dans des revues scientifiques, organisation et/ou participation à des conférences scientifiques - Fiches de synthèse, séminaires annuels, journées de restitution des résultats d'OPUR
Thème D3 : Transfert vers les acteurs opérationnels	Groupes de travail, ateliers de réflexions et de débats, journées techniques....

Tableau 1 : Thèmes et actions de recherche – OPUR 5

Le second volet du thème 2 vise à optimiser le fonctionnement des ouvrages d'assainissement soit en évaluant les performances et limites de nouveaux procédés de traitement soit en cherchant à mieux modéliser la qualité des flux de contaminants à l'entrée d'une station d'épuration en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés plus à l'amont dans le réseau d'assainissement.

Deux actions relatives à l'optimisation ont été identifiées :

- Action R2.4 : Modélisation des flux de matières dans le réseau d'assainissement du SIAAP
- Action R2.5 : Traitement tertiaire en station d'épuration – procédés d'oxydation des eaux résiduaires urbaines

En amont de la station d'épuration, l'action proposée vise à développer et à évaluer des modèles prédictifs de la qualité des eaux à l'entrée d'une station d'épuration en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés en amont dans le réseau d'assainissement afin d'optimiser la gestion des stations d'épuration recevant ces eaux.

Au sein de la station d'épuration, il s'agira d'étudier 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). Ces travaux s'inscrivent pleinement dans la continuité des travaux d'OPUR suite du comportement des polluants prioritaires et d'autres substances le long des filières de traitement des eaux résiduaires urbaines (phase 3) et l'élimination de nombreux micropolluants prioritaires et émergents par charbon actif (phase 4, thèses R. Mailler, 2012-2015, thèse R. Guillosou, 2016-2019). Leur originalité réside à la fois dans la diversité des effluents et des procédés d'oxydation étudiés. Ils 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 et environnemental.

Le thème 3 d'OPUR5 a pour finalité l'optimisation de la conception et de la gestion des ouvrages de contrôle à la source des eaux de ruissellement urbaines. Le focus est mis plus particulièrement sur les ouvrages faisant appel aux services écosystémiques d'un sol ou substrat végétalisé.

La gestion alternative des eaux pluviales urbaines a été questionnée dans l'observatoire OPUR à partir de sa phase 3. Les résultats obtenus ont permis des avancées notables sur certains aspects, ils ont également fait émerger de nouvelles interrogations sur le fonctionnement de ces ouvrages. Concernant le fonctionnement hydrologique, les travaux de recherche passés mettent en évidence l'insuffisance des approches de modélisation actuelles pour la description de la composante évapotranspiration. Concernant les polluants, les travaux sur l'efficacité des ouvrages et sur le devenir des polluants interceptés se sont essentiellement concentrés sur la question des métaux et des hydrocarbures. Les données sur le comportement des micropolluants organiques restent encore trop limitées.

Le thème 3 d'OPUR5 est structuré autour de cinq actions de recherche :

- Action R3.1 : Modélisation de l'évapotranspiration à différentes échelles spatiales
- Action R3.2 : Performance hydrologique des jardins de pluie : mesures en conditions contrôlées et modélisation pour une diversité de contextes
- Action R3.3 : Evaluation de la performance hydrologique des « Arbres de pluie »
- Action R3.4 : Devenir des micropolluants piégés dans les substrats : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants organiques
- Action R3.5 : Analyse des dynamiques temporelles au niveau d'un ouvrage de biorétention

Il vise l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrologique des ouvrages de gestion à la source des eaux de ruissellement d'une part et sur le devenir des micropolluants piégés dans les substrats filtrants d'autre part. Il ambitionne également de proposer des outils de modélisation adaptés à la description de ces phénomènes.

Ce thème s'appuiera essentiellement pour le volet expérimental sur de l'acquisition de données en conditions contrôlées au laboratoire pour le devenir des polluants piégés et sur de l'acquisition de données sur ouvrage pilote en conditions contrôlées dans la mini ville climatique Sense-City pour le suivi du fonctionnement hydrologique. Ces données pourront être complétées par celles acquises sur le long terme sur le site de Compans.

Le second volet porte sur le développement et/ou l'évaluation de différentes approches de modélisation des transferts d'eau et de polluants dans les ouvrages.

Le thème 4 adopte une démarche de modélisation pour évaluer les « effets combinés » d'une diffusion des nouveaux modes de gestion des eaux pluviales en ville, et plus précisément leur capacité à *compenser* certains impacts négatifs (i) de l'évolution urbaine, (ii) du changement climatique, et (iii) des modifications des pratiques de construction, trafic, usages, etc. La finalité du travail est donc le développement et l'application d'outils destinés à :

1) Mettre en évidence les effets « à large échelle » :

- de solutions de gestion décentralisée ;
- de critères locaux (e.g. abattement des X premiers mm à chaque événement pluvieux).

2) Identifier des configurations « optimales » de mise en œuvre de la gestion à la source, c'est-à-dire :

- des scénarios de déploiement optimisés pour répondre à un objectif donné : combien d'ouvrages, à quel endroit, quelle conception (infiltration, rétention, présence d'un volume mort, etc.), quels bénéfices d'une combinaison d'ouvrages ?
- une réglementation adaptée (PLU, critère local donné aux aménageurs, etc.)

3) Creuser la question de la combinaison optimale entre le système centralisé existant (dont il n'est pas question de se passer) et les dispositifs décentralisés qui viendraient pallier les insuffisances du premier ; cette question peut encore se reformuler comme la recherche d'une combinaison optimale entre solutions « traditionnelles » et « innovantes ».

Plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés au cours des réflexions préliminaires autour de la définition du projet. :

- La représentation des processus hydrologiques (notamment l'évapotranspiration et l'infiltration) dans les modèles pose encore certaines questions.
- Les modèles de production de polluants disponibles ont un pouvoir prédictif faible.
- La représentation des ouvrages de gestion à la source, la description correcte du réseau, ainsi que les couplages entre hydrologie de surface et réseau, présentent également plusieurs enjeux de recherche.
- Etant donné que l'on souhaite évaluer les effets du changement climatique, de l'évolution urbaine et des changements de pratiques, il est nécessaire (i) de *traduire* les projections climatiques et urbaines à l'horizon souhaité en données d'entrée pertinentes pour l'outil de modélisation utilisé, ce qui implique une démarche de désagrégation de ces données (Figure 1), et (ii) de *construire* des hypothèses sur les nouvelles pratiques.
- L'évaluation des scénarios se fait toujours à l'aune de critères/indicateurs de performance qu'il convient de définir au préalable. Ceux-ci pourraient inclure, sans s'y limiter :
 - la part de l'évapotranspiration et de l'infiltration dans le bilan hydrologique (ce que certains auteurs anglophones nomment la *capacitance* du bassin versant) ;
 - le flux annuel de différents contaminants envoyés vers les eaux superficielles, le sol ou la nappe phréatique ;

- l'économie de ressource en eau pour certains usages ;
- des indicateurs plus qualitatifs pour caractériser par exemple l'impact sur la biodiversité, le confort thermique ou l'adaptation au changement climatique.
- Enfin, une question cruciale réside dans l'établissement de scénarios *réalistes* de déploiement des ouvrages de gestion à la source.

Afin de faire sauter ces verrous et de permettre la mise en œuvre de la démarche de modélisation dans son ensemble, **un consortium de recherche** sera constitué entre trois équipes : le Laboratoire Eau et Environnement (IFSTTAR à Nantes), le Cerema Ile-de-France, et le Laboratoire Eau, Environnement, Systèmes Urbains. Ce partenariat se construira autour de trois outils de modélisation co-développés et/ou utilisés par les membres du consortium : **SWMM**, **URBS** et **TEB-HYDRO**.

Dans le cadre de ce consortium, plusieurs actions de recherche ont été définies pour mener à bien ce quatrième thème d'OPUR 5 :

- **Action R4.1** : *Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier*
- **Action R4.2** : *Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain*
- **Action R4.3** : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur*
- **Action R4.4** : *Modélisation de l'émission des polluants à l'échelle urbaine*
- **Action 4.5** : Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie – Pollution – Climat urbain »

Une description plus détaillée de toutes les actions de recherche du bloc « Recherche » est donnée en annexe.

2. Bloc « observation pérenne »

Depuis 1994, OPUR a connu des évolutions importantes des infrastructures expérimentales en lien avec l'évolution des questions scientifiques traitées dans les différentes phases du programme. Cependant, durant toutes ces années, il n'a pas été possible de dégager les moyens nécessaires pour suivre sur de longues durées la qualité des eaux et la performance des ouvrages de gestion. La phase 4 d'OPUR a été l'occasion de réfléchir avec les partenaires à la mise en place d'un observatoire pérenne en milieu urbain en ciblant des sites ou des ouvrages de référence. Cette réflexion a confirmé l'intérêt des observations pérennes dans une ville en pleine transition et a permis d'identifier deux projets d'observatoires pérennes pour la phase 5 d'OPUR : Un observatoire sur la gestion à la source des eaux pluviales et un autre sur les micropolluants dans les eaux urbaines

L'observatoire de la gestion à la source a deux objectifs : (1) analyser la durabilité et la pérennité des solutions de gestion à la source des eaux pluviales mises en œuvre sur un quartier ou plusieurs, en se focalisant en particulier sur les solutions les plus innovantes ou répondant à des enjeux multiples ; (2) évaluer la performance globale d'une gestion à la source systématisée des eaux pluviales à l'échelle d'un bassin versant.

La phase 5 d'OPUR permettra la maturation de l'idée de l'observatoire de la gestion à la source ; le choix du ou des quartiers (ou opérations d'aménagement) pilotes ; la caractérisation des contextes institutionnels, organisationnels et techniques des opérations d'aménagement retenues pour constituer l'observatoire ; la collecte de données sur les dispositifs de gestion à la source mis en œuvre et de leur fonctionnement. Elle comportera une première action d'observation, focalisée sur la phase de conception et de déploiement de la gestion à la source sur les quartiers retenus.

Il s'agit dans cette première phase d'analyser les pratiques actuelles de déploiement de la gestion à la source, depuis les phases de conception du système et de son intégration dans un dispositif urbain plus large, jusqu'aux étapes de dimensionnement et de mise en œuvre des ouvrages, et ce afin d'en

évaluer la pertinence et les limites tant d'un point de vue technique que d'un point de vue organisationnel

Les travaux s'organiseront autour des questions suivantes :

- Quels objectifs de gestion de l'eau sur le quartier / la zone d'aménagement étudiés (objectifs hydrauliques ou hydrologiques, mais aussi objectifs thermiques, objectif de gestion des polluants, et de protection de la ressource) ? Par qui et comment ont-ils été définis ? Sont-ils compris et partagés par l'ensemble de la chaîne d'acteurs ?
- Comment ces objectifs sont-ils traduits dans les prescriptions techniques données aux aménageurs (quels critères) ? Comment ces prescriptions sont-elles appréhendées dans les méthodes de conception et de dimensionnement de l'ouvrage ? Ces méthodes de conception/dimensionnement permettent-elles effectivement d'assurer l'atteinte des objectifs initiaux ? Les outils et approches disponibles/utilisés sont-ils adaptés aux objectifs ?

Ces travaux se baseront sur l'observation des quartiers pilotes qui seront retenus pour constituer l'Observatoire de la Gestion à la Source au sein d'OPUR. Deux sites sont à ce jour envisagés : l'écoquartier La Vallée et son démonstrateur E3S à Chatenay Malabry, et un second quartier à Marne la Vallée.

L'observatoire des micropolluants dans les eaux urbaines permet d'atteindre deux objectifs : (1) réaliser un état zéro de référence sur l'agglomération parisienne ; (2) Accéder à la variabilité temporelle des concentrations et flux au regard de l'évolution des pratiques et des compositions des produits de consommation.

Cet observatoire, unique en France, dépassera le cadre d'une phase du programme OPUR pour s'installer durablement dans le paysage francilien. Le caractère unique de cet observatoire viendrait du fait qu'il s'intéresserait à la qualité des eaux usées urbaine très en amont du cycle de l'eau alors que, généralement, ce type d'observatoire est plus orienté sur le milieu récepteur.

Les travaux prévus s'organiseront autour de trois parties. La première partie concerne la définition des contours de l'observatoire des micropolluants pour ce qui concerne le type d'observation à développer, le site à privilégier et la fréquence de suivi à adopter. La deuxième partie consiste en la mise en place, à titre expérimental, d'un dispositif qui préfigurerait l'observatoire futur, notamment sur l'approche choisie, en travaillant sur le hall d'essai de Seine Centre. La dernière partie porte sur le suivi de la qualité des dépôts dans les chambres à sable afin de permettre d'accéder à des phénomènes se produisant à des échelles de temps plus longues, d'autant plus longue que la fréquence de maintenance est grande.

Une description plus détaillée des observatoires prévus est donnée en annexe.

3. Bloc « diffusion des connaissances ».

OPUR a toujours porté une attention particulière à la diffusion des connaissances et au maintien d'échanges efficaces avec les partenaires du programme. Et, dans un souci d'amélioration continue de ces échanges, des outils de gestion de l'interface acteurs scientifiques/institutionnels utilisés dans le cadre de ce programme ont fortement évolué depuis sa création en 1994. Ainsi depuis la phase III de ce programme (depuis 2007) de véritables plateformes de communication ont été mises en place. Le bloc « diffusion des connaissances » de la phase 5 vise à renforcer la valorisation des résultats d'OPUR en s'appuyant sur une collaboration entre OPUR et l'association ARCEAU. A l'heure actuelle, nous pouvons distinguer plusieurs thèmes de valorisation possibles :

(1) Thème D1 : Communication sur OPUR

- Amélioration et mise à jour du site web d'OPUR
- Mise en place d'une lettre d'information sur OPUR

- Rédaction de fiches « résultats phares »
 - Rédaction d'un ouvrage sur les 25 ans d'OPUR
- (2) Thème D2 : Communication scientifique et technico-scientifique des résultats de la recherche
- Rédaction d'articles scientifiques
 - Organisation et/ou participation à des conférences scientifiques
 - Organisation d'un séminaire annuel d'avancement de la recherche
 - Organisation d'un colloque national de restitution des résultats d'OPUR5
 - Rédaction d'un dossier TSM
- (3) Thème D3 : Transfert vers les acteurs opérationnels :
- Mise en place d'un groupe de travail par thème pour préciser les besoins des opérationnels et mettre en place les organisations nécessaires pour les satisfaire.
 - Organisation d'une ou deux journées techniques à destination des opérationnels
 - Organisation d'ateliers de co-réflexion et de mise en débat des connaissances

GOVERNANCE D'OPUR5

OPUR est coordonné par Ghassan CHEBBO, Directeur de recherche (première classe) à l'ENPC, assisté par Marie-Christine Gromaire directrice de recherche (2ème classe) à l'ENPC.

Le programme scientifique d'OPUR comporte plusieurs thèmes de recherche. Chaque thème de recherche est animé par un ou deux chercheurs confirmés. Les animateurs assurent les rôles suivants :

- Suivi des actions de recherche
- Animation scientifique : réunions, séminaires
- Organisation : rapports d'avancement, fiches techniques, réponses appels d'offres, sujets de thèse, évolution des problématiques.

Le suivi de l'avancement d'OPUR est assuré par les comités suivants :

- Comité interne OPUR
 - Composition : personnel scientifique et technique d'OPUR
 - Fréquence des réunions : 4 à 6 réunions par an
 - Fonctions : suivi et gestion administratifs, financières et scientifiques.
- Comité des partenaires
 - Composition : personnel scientifique et technique d'OPUR + représentants des partenaires opérationnels
 - Fréquence des réunions : 1 réunion par an
 - Fonctions : suivi de l'avancement de la recherche

PARTENAIRES

Les travaux de recherche d'OPUR sont menés en lien avec plusieurs réseaux régionaux et nationaux :

- Réseaux de recherche et de valorisation régionaux :
 - ZA-Seine
 - PIREN-Seine
 - OSU EFLUVE
 - FIRE
 - ARCEAU
 - ASTEE et SHF
- Réseaux de recherche nationaux :

- URBIS
- RST

La phase 5 d'OPUR sera réalisée en partenariat avec

- l'Agence de l'Eau seine Normandie (AESN),
- le Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP)
- la ville de Paris,
- la Direction de l'Eau et de l'Assainissement de Seine-Saint-Denis (DEA 93),
- la Direction des Services de l'Eau et de l'Assainissement du Val-de-Marne (DSEA 94),
- la Direction de l'Eau et de l'Assainissement des Hauts de Seine (DEA 92),

Plusieurs organismes de recherche participent à la réalisation et au suivi des actions de recherche :

- Laboratoire Eau, Environnement et systèmes urbains (LEESU)
- Laboratoire d'Hydraulique Saint Venant
- IFSTTAR à Nantes
- Cerema – Ile de France
- UMR METIS
- Institut Européen des Membranes (IEM) Montpellier
- ISA Lyon
- Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)
- DIE SIAAP
- Eau de Paris,
- Laboratoire de la Préfecture de la Police de Paris (LCPP)
- CNRM, Equipe Ville, Groupe de Météorologie à Moyenne échelle
- IRSTEA

CONTACT

Ghassan Chebbo (coordonnateur d'OPUR) : ghassan.chebbo@enpc.fr



THEME R1 : QUALITE MICROBIOLOGIQUE DES EAUX PLUVIALES

CONTEXTE :

Ces dernières décennies la qualité des eaux de surface s'est généralement améliorée en Europe, due à l'application de la réglementation, à l'amélioration des stations d'épuration (STEP) et des réseaux d'assainissement. De ce fait de nombreuses villes promeuvent l'ouverture de baignade permanentes dans leurs eaux de surface, et l'organisation de compétitions de nage en eau libre. Ceci concerne de nombreuses capitales comme Paris, Berlin, et Londres. En région parisienne il émerge une forte demande sociale et politique d'organiser des activités récréatives et sportives dans les plan d'eau et les rivières urbaines.

A l'heure actuelles les eaux de surface de la Seine et la Marne reçoivent un grand nombre de rejets d'origine très diverses (rejets de stations d'épuration, rejets de déversoirs d'orage, déjections d'oiseaux) qui contribuent à une pollution microbiologique sérieuse, rendant ces rivières urbaines impropres à la baignade (Ashbolt et al., 2010). De ce fait il existe un risque que les baigneurs s'exposent à des infections entériques, respiratoires et dermiques. Ainsi aux Pays-Bas entre 1991 et 2007, 742 épidémies de gastroentérites liées à la nage en eaux de surface ont eu lieu (Schets et al. 2011). La qualité microbiologique des eaux de surface est d'autant plus dégradée en temps de pluie, et il est attendu que les changements futures de pluviométrie augmenteront le risque de contracter une maladie d'origine hydrique (IPCC, 2012 ; Bezirtzoglou et al. 2011 ; Coffey et al. 2014) . Une pluie de retour de 20 ans a augmenté d'un facteur de 5 le risque pour les triathlètes de contracter une gastroentérite lors d'une compétition à Copenhague (Hader-Lauridsen et al., 2013). Selon la directive européenne sur les activités de baignade (EU, 2006), le classement des eaux de baignades est basée sur la mesure de bactéries indicatrices de contamination fécale (BIF) qui présentent une faible relation avec les microorganismes pathogènes (Schets et al., 2011; Fewtrall and Kay, 2015). De ce fait pour une estimation complète des risques il est judicieux d'estimer les concentrations en pathogènes en plus des indicateurs de contamination fécale. De plus les indicateurs réglementaires ne permettent pas de distinguer l'origine des contamination. Des efforts récents pour identifier les sources ont focalisé sur la recherche d'indicateurs plus spécifiques à l'aide de méthodes moléculaires (Simpson et al. 2012). Cependant ces approches sont basées sur des bases de données qui ont besoin d'être implémentées pour les sources d'origine urbaines en collectant un ensemble de sources de contaminations représentatives et en les caractérisant d'un point de vue microbiologique. En effet la variabilité spatiale et temporelle de la qualité microbiologique des eaux urbaines et des rejets reste peu qualifiée du fait de la difficulté à prendre en compte la nature variée des sources de pollution et de la variabilité des conditions hydrologiques et climatologiques. Ce manque de connaissance de la distribution et la concentration des divers pathogènes d'origine hydrique rend difficile la maîtrise des contaminations et la gestion des sites de baignade.

Dans le cadre du programme OPUR, un travail de caractérisation microbiologique des rejets de station d'épuration avait été entamé lors des deux précédentes phases, que ce soit pour les virus entériques, les mycobactéries, *Campylobacter jejuni* ou les salmonelles (Radomski et al. 2011, Lucas et al. 2014). Ces travaux ont été conduits étroitement avec le SIAAP, qui a également un programme de suivi des concentrations en BIF dans les rejets de ses usines de traitement depuis des années. De plus Eau de Paris effectue depuis des années des suivis de qualité microbiologique en Seine, qui portent sur les BIF, les virus entériques, *Cryptosporidium* et *Giardia* et qui s'est fait parfois dans le cadre du programme PIREN-Seine (e.g. Moulin et al. 2010, Mons et al. 2009, Prevost et al. 2015). Ces études incluent l'estimation de l'impact des rejets de STEP et/ou de déversoirs d'orage sur la qualité microbiologique des eaux de la Seine. Au printemps 2018, les

concentrations en BIF ont également été estimées dans des rejets de temps sec du canal de l'Ourcq par les services des Canaux de la Ville de Paris, mais seulement sur une campagne dans le cadre d'un stage de Master 2. Concernant les rejets de temps de pluie, une caractérisation de l'impact de rejets du déversoir d'orage de Clichy-Labriche avait été réalisé dans le cadre du programme PIREN-Seine, mais ne portait essentiellement que sur les BIF (Passerat et al. 2011). Enfin la qualité microbiologique des rejets de temps de pluie de l'ouvrage cadre du lac de Créteil et leur impact sur la qualité des eaux du lac ont été étudiés dans le cadre du projet PULSE financé par l'ANR, la Ville de Créteil et le Conseil Départemental du Val de Marne, toutefois seuls les BIF et les mycobactéries avaient été mesurés (Roguet et al. 2017). Les données sur la qualité microbiologique des rejets de temps de pluie et temps sec en région parisienne sont donc pour l'instant éparpillées en particulier pour les concentrations en pathogènes dans les rejets urbains de temps de pluie.

OBJECTIFS

Le but du thème 1 est de caractériser la contribution des différents types de sources diffuses et ponctuelles de pathogènes d'origine hydrique et de bactéries résistantes aux antibiotiques, afin de mieux évaluer et prédire les risques. Ceci nécessite non seulement d'acquérir de la connaissance sur les niveaux et la nature de la contamination dans différents types de rejets, mais aussi de développer des outils de suivi et de prédiction par modélisation statistique et déterministe. Pour ce faire différents sites de prélèvement sur des petits bassins d'apport de rejets en Marne, en Seine, ou sur le canal de l'Ourcq seront échantillonnés. Le Bassin de la Villette sera utilisé comme site modèle pour développer à l'aide d'un modèle hydrodynamique une approche de prédiction et de hiérarchisation des flux apportés par les sources de contamination. Deux actions seront menées (i) Sources et flux et (ii) Bassin de la Villette. Le projet est porté par le LEESU et associe 2 autres laboratoires (METIS et Biologie Recherche d'Eau de Paris). Il s'appuiera sur une collaboration scientifique et technique étroite avec différents gestionnaires du Conseil Départemental (CD) 93, du CD 94, de la Ville de Paris, et du SIAAP. Des études récentes ont suggéré que les virus entériques (surtout les *Adenovirus*, *Rotavirus* et *Norovirus*), *Campylobacter* spp., *Cryptosporidium* et *Giardia* sont les agents étiologiques d'intérêt majeur pour le nageur (Haile et al., 1999; Mons et al. 2009; Prevost et al. 2015; Eregno et al., 2016). De plus plusieurs cas d'infection par des leptospires lors de compétitions de triathlon ont pu être constatées en Europe. Enfin l'émergence ces dernières années de bactéries multirésistantes aux antibiotiques (notamment via dans les rejets hospitaliers) représente un enjeu majeur pour l'Organisation Mondiale de la Santé et l'ANSES. Le projet portera donc sur cet ensemble de pathogènes, les *Escherichia coli* résistantes aux antibiotiques, les indicateurs de contamination fécale réglementaires et ceux plus spécifiques de certaines sources humaines et animales.

ANIMATEURS

Françoise Lucas, LEESU, Université Paris-Est Créteil (UPEC)
lucas@u-pec.fr

Brigitte Vinçon-Leite, LEESU, Ecole des Ponts (ENPC)
b.vincon-leite@enpc.fr

REFERENCES

Ashbolt NJ, Mary Schoen ME, Soller JA, Roser DJ (2010). Predicting pathogen risks to aid beach management: The real value of quantitative microbial risk assessment (QMRA). *Water Res.* 44 : 4692 -4703

- Bezirtzoglou C, Dekas K, Charvalos E (2011). Climate changes, environment and infection: Facts, scenarios and growing awareness from the public health community within Europe. *Anaerobe*, 17; 337–340.
- Coffey R, Bemham B, Krometis LA, et al. (2014). Assessing the effects of climate change on waterborne microorganisms: Implications for EU and US water policy. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 20; 724–742.
- Eregno FE, Tryland I, Tjomsland T, et al.(2016). Quantitative microbial risk assessment combined with hydrodynamic modelling to estimate the public health risk associated with bathing after rainfall events. *Sci.Total Environ.* 548–549: 270–279
- European Union, 2006. Directive 2006/7/EC of The European Parliament and of the Council of 15 February 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC. *Off. J. Eur. Union L* L64, pp.37-51.
- Fewtrell L, Kay D (2015). Recreational Water and Infection: A Review of Recent Findings. *Curr Envir Health Rpt* 2:85–94
- Haile RW, Witte JS, Gold M, Cressey R, et al., (1999). The health effects of swimming in ocean water contaminated by storm drain runoff. *Epidemiology* 10, 355–363.
- Harder-Lauridsen NM, Gaardbo Kuhn K, et al. (2013). Gastrointestinal Illness among Triathletes Swimming in Non-Polluted versus Polluted Seawater Affected by Heavy Rainfall, Denmark, 2010-2011. *PlosOne* 8(11-e78371):1-8
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. CB Field. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press: p 582.
- Lucas FS, Thierial C, Gonçalves A, Servais P, Rocher V, Mouchel J-M (2014) Variation of raw wastewater microbiological quality in dry and wet weather conditions. *Environ. Sci. Pollut. R.* 21: 5318–5328.
- Mons C, Dumètre A, Gosselin S, Galliot C, Moulin L (2009). Monitoring of *Cryptosporidium* and *Giardia* river contamination in Paris area. *Water Res.* 43: 211–217
- Moulin L, Richard F, Stefania S, Goulet M, Gosselin S, Gonçalves A, Rocher V, Paffoni C, Dumètre A (2010). Contribution of treated wastewater to the microbiological quality of Seine River in Paris. *Water Res.* 44: 5222–5231
- Passerat J, Ouattara NK, Mouchel J-M, Vincent Rocher, Servais P (2011) Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Research* 45:893–903.
- Prevost B., Lucas F.S., Goncalves A., Richard F., Moulin L. Wurtzer S. (2015). Large scale survey of enteric viruses in river and waste water underlines the health status of the local population. *Environment international* 79: 42-50. 2
- Radomski N, Betelli L, Moilleron R, Haenn S, Moulin L, Cambau E, Rocher V, Goncalves A, Lucas FS (2011). *Mycobacterium* behavior in wastewater treatment plant, a bacterial model distinct from *Escherichia coli* and *Enterococci*. *Environ Sci Technol.* 45 : 5380-6
- Roguet A, Thierial C, Catherine A, Bressy A, Varrault G, Bouhdamane L, Tran V, Lemaire BJ, Vincon-Leite B, Saad M, Moulin L, Lucas FS (2017). Importance of Local and Regional Scales in Shaping *Mycobacterial* Abundance in Freshwater Lakes. *Microb Ecol* 4:834-846
- Schetz FM, Schijven JF, de Roda Husman AM (2011). Exposure assessment for swimmers in bathing waters and swimming pools. *Water Research* 45:2392-2400
- Simpson JM, Santo Domingo JW, Reasoner DJ (2002). Microbial Source Tracking: State of the Science *Environ. Sci. Technol.*, 36: 5279–5288



CONTEXTE

Les eaux de surface dans les environnements fortement urbanisés, comme la Seine et la Marne en région Parisienne, peuvent contenir un ensemble de pathogènes d'origine fécale ou environnementale. Les contaminations fécales peuvent être d'origine humaine ou animale et peuvent provenir de sources ponctuelles (effluents de stations d'épuration, rejets de déversoirs d'orage et d'ouvrages cadres) ou de sources diffuses (ruissellement sur des surfaces contaminées, resuspension des sédiments, érosion des sols et berges) par temps sec et par temps de pluie. Les rejets de temps de pluie sont notamment à l'origine de fortes dégradations de la qualité des eaux de surface. Les pathogènes peuvent inclure les *E. coli* entérohémorragiques, *Salmonella*, *Shigella*, *Campylobacter*, *Vibrio cholerae*, les virus entériques (Norovirus, Adenovirus, Rotavirus, enterovirus, Hepatitis virus...) et des parasites (*Cryptosporidium*, *Giardia*). Les rongeurs peuvent aussi être porteur de *Leptospirae* et contaminer les eaux de surface. Enfin certaines espèces autochtones des milieux aquatiques peuvent devenir des pathogènes opportunistes (e.g. mycobactéries non-tuberculeuses, *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Plesiomonas*). Par ailleurs certains de ces pathogènes comme *E. coli* ou les *Pseudomonas* peuvent arborer des résistances multiples aux antibiotiques et ainsi exacerber le risque sanitaire.

La variabilité spatiale et temporelle des concentrations en pathogènes et des bactéries résistantes aux antibiotiques reste encore peu connue dans les milieux aquatiques urbains par temps de pluie, malgré l'importance des rejets de temps de pluie dans la gestion des baignades. Ceci tient notamment à la forte variabilité temporelle des événements pluvieux et à la grande diversité des réseaux d'assainissement et des surfaces urbaines ruissellées. L'action 1.1 aura pour but d'apporter des connaissances sur la distribution d'un large éventail d'indicateurs de contamination fécale humains et animaux, de pathogènes bactériens et viraux, et de l'antibiorésistance dans les rejets de temps de pluie afin de mieux caractériser l'origine et d'importance relative des différentes sources de contamination microbiologique des eaux de surface en agglomération parisienne.

OBJECTIFS

L'objectif de l'action 1.1 est de caractériser d'un point de vue microbiologique les sources et flux de contamination microbiologique des eaux des rivières et canaux franciliens afin

- i) d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique et de la distribution de différents pathogènes bactériens et viraux dans les rejets de temps de pluie et les eaux de ruissellement
- ii) d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique et des résistances aux antibiotiques dans les rejets de temps de pluie et les eaux de ruissellement
- iii) de mieux connaître l'origine des sources de contamination dans les eaux de surface
- iv) d'identifier par modélisation statistique des facteurs physico-chimiques liés la qualité microbiologique des rejets qui pourraient servir de proxy pour le suivi de la qualité des rejets

METHODOLOGIE ET PLANNING

Sites étudiés. Cinq réseaux d'assainissement urbains allant du rejet de station d'épuration au rejet de réseau séparatif pluvial strict seront définis en accord avec le SIAAP, le Conseil Départemental (CD) de la Seine-St-Denis, le CD du Val-de-Marne et la Ville de Paris, de façon à couvrir un continuum de rejets d'origine domestique et pluviale strict ou en mélange. Sur un des réseaux pluviaux dont le bassin versant est bien caractérisé car déjà étudié dans les phases précédentes

d'OPUR, deux types de surfaces imperméables avec et sans circulation d'animaux seront échantillonnés pour évaluer la contribution des animaux à la contamination des rejets pluviaux.

Campagnes de prélèvement. Les rejets seront instrumentés pour réaliser l'échantillonnage en accord avec les partenaires opérationnels. A chaque campagne un échantillonnage représentatif de l'événement pluvieux sera réalisé, ainsi qu'un prélèvement d'eau de surface au droit du rejet.

Protocole analytique.

- *Indicateurs de contamination fécale et sources de contamination* : Les analyses d'indicateurs de contamination fécale (*E. coli*, entérocoques intestinaux, Bactéroidales spécifiques des chiens, des oies et *Catellibacillus marimammalius*) seront pris en charge par le LEESU. *Escherichia coli* et les entérocoques intestinaux seront analysés selon les normes NF EN ISO 9308-3 et 7899-1, les autres marqueurs seront quantifiés par PCR en temps réel. Afin de caractériser l'origine des sources de contamination par une approche moléculaire de dépistage, l'analyse des communautés bactériennes sera également réalisée par le LEESU. La composition des communautés bactériennes sera examinée par séquençage à haut débit du gène de l'ARNr 16S. Les ADN seront gardés pour constituer une base de référence. Le séquençage sera sous-traité au laboratoire de H. Morrison, (Josephine Bay Paul Center, Marine Biological Laboratory, Woods Hole, USA).

- *Pathogènes* : Les salmonelles, les mycobactéries, *Campylobacter jejuni* et *C. lari* seront analysés par le LEESU. Les leptospires et les virus entériques majeurs (norovirus GI et GII, adénovirus, Rotavirus A) seront analysés par le laboratoire de recherche biologie d'Eau de Paris. Les quantifications seront réalisées par PCR en temps réel.

- *E. coli résistantes aux antibiotiques* : pour chaque échantillon 35 à 50 souches d'*E. coli* résistantes aux antibiotiques seront isolées et la présence d'intégrons sera recherchée. La collection de souche sera stockée à -80°C en cryobilles, ainsi que les ADN, pour constituer des collections de référence géoréférencées.

- Paramètres physico-chimiques : pour chaque échantillon, les paramètres physico-chimiques classiques seront mesurés (pH, conductivité, COD, COP, NH₄). Ces paramètres seront utilisés pour effectuer une analyse statistique des facteurs expliquant la variabilité des concentrations en BIF et pathogènes dans les rejets.

Calendrier.

Pour le temps sec 5 campagnes seront réalisées qui serviront de référence par rapport au temps de pluie. Pour le temps de pluie un nombre plus important de campagnes (6 à 12) sera réalisé pour avoir un ensemble de pluies (>5 mm cumulés) suivant des périodes de temps sec de longueur variable. Les échantillonnages seront réalisés du printemps à l'automne 2019, 2020 et 2021 (en particulier sur les mois de juin à septembre qui correspondent à la période d'ouverture des baignades) en fonctionnement de temps sec.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Les résultats de l'action 1.1 permettront de mieux connaître la contamination véhiculée par les rejets de temps de pluie d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Ils permettront également :

- i) de constituer une banque d'échantillons d'ADN, et une collection de souches bactériennes résistantes aux antibiotiques qui seront représentatifs de divers types de réseaux d'assainissement,
- ii) de constituer une banque d'échantillons d'ADN, et une collection de souches bactériennes résistantes aux antibiotiques qui seront représentatifs de divers types de surface ruissellées,
- iii) d'améliorer les méthodes de détection des sources de contamination par comparaison de communautés bactériennes, en implémentant la base de données de séquences représentatives de différentes sources humaines et animales déjà existante au LEESU

iv) de pouvoir mieux hiérarchiser les sources de contamination en Seine, en Marne et au bassin de la Vilette
v) de définir les paramètres microbiologiques et physico-chimiques importants pour le suivi de la qualité microbiologique des eaux urbaines
vi) d'aider à la définition de protocoles d'échantillonnage et de mesure pour le suivi de la qualité microbiologique des eaux urbaines
par ailleurs les données qui seront acquises sur les niveaux de contamination dans les rejets pourront alimenter certains paramètres du modèle hydrodynamique qui sera développé dans l'action 1.2.

CONTACTS

Françoise Lucas, LEESU, Université Paris-Est Créteil (UPEC)
lucas@u-pec.fr



CONTEXTE

Depuis le début des années 2000, la pratique de la baignade en eau libre s'accroît dans de nombreuses régions métropolitaines. A Paris, l'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques en 2024 accentue les enjeux autour de la baignade en eau libre et incite à la rendre possible de façon durable dans l'ensemble de la région. Il est pour cela nécessaire que la qualité des milieux aquatiques soit compatible avec les réglementations sanitaires en vigueur. En France le contrôle des eaux de baignade, en particulier vis-à-vis des bactéries indicatrices de contamination fécale (BIF), est effectué par les Agences régionales de Santé (ARS) en accord avec les préconisations d'une Directive Européenne (2006/7/CE).

Dans le cadre de Paris-Plage, une baignade est ouverte depuis l'été 2017 dans le bassin de la Villette. Les risques sanitaires encourus par les baigneurs doivent être prévenus en évitant leur exposition à des contaminations par des micro-organismes pathogènes, notamment lors des temps de pluie qui dégradent fortement la qualité de l'eau du bassin.

OBJECTIFS

L'objectif de cette action est de développer un système intégré de surveillance et d'alerte des risques de contamination par des pathogènes au niveau de la zone de baignade du bassin de la Villette, afin d'aider la prise de décision des gestionnaires.

Plusieurs sous-objectifs sont identifiés ci-dessous :

- Compréhension et modélisation du fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Villette
- Couplage d'un module de transport des contaminants microbiologiques;
- Mise en œuvre d'une méthode d'apprentissage automatique pour la prévision du risque sanitaire;
- Développement d'un prototype de système de surveillance et d'alerte en ligne.

METHODOLOGIE ET PLANNING

1. *Suivi de l'hydrodynamique et des micro-organismes pathogènes*

- *Hydrodynamique* : Afin de connaître les temps de transfert des contaminants microbiologiques lors des temps de pluie ou des chomages d'ouvrage depuis le canal de l'Ourcq vers la baignade dans le bassin de la Villette, il est nécessaire de connaître les champs de vitesse dans le système. Durant l'été, le bassin de la Villette est stratifié thermiquement, ce qui peut modifier la distribution spatiale des champs de vitesse. Il est donc indispensable de connaître également la structure thermique du bassin et son évolution.

Il n'existe actuellement pas de suivi des variables hydrodynamiques dans le bassin de la Villette. Des capteurs de mesure en continu de la température de l'eau seront donc installés dans le bassin en trois points et trois profondeurs. Des campagnes ponctuelles de mesure des profils de vitesse seront réalisées en plusieurs périodes caractéristiques du fonctionnement hydrodynamique estival du bassin (par exemple période de canicule, période suivant un orage...). De plus, pendant la saison de baignade, des profils hebdomadaires de variables physico-chimiques et biologiques seront également réalisés (Température, O₂, conductivité, pH, Chlorophylle-a, Phycocyanine).

- *Paramètres microbiologiques et physico-chimiques* : En plus du suivi de la concentration en Entérocoques intestinaux et en *E. coli* dans les bassins de baignade, une station d'alerte installée à

environ 1km à l'amont de la zone de baignade (rond-point des canaux) permet la mesure *in situ* quotidienne de ces bactéries indicatrices de contamination fécale. Ceci sera complété par deux lignes de capteurs (température, conductivité et turbidité) fourniront des mesures à fréquence élevée (15mn). L'une sera installée à proximité immédiate de la station d'alerte et disposera d'un système de transmission des données par GPRS et l'autre sera située au niveau de la zone de baignade.

Des prélèvements et analyses de BIF et de paramètres physico-chimiques (COD, Fluo3D, MES) seront dans le bassin de la Villette à mi-chemin de la station d'alerte et du site de baignade, durant différents épisodes hydrologiques (période de sécheresse, période pluvieuse, à la suite d'un orage...). Des profils de variables physico-chimiques et biologiques seront réalisés en parallèle (température, O₂, conductivité, pH, Chlorophylle-a, Phycocyanine). Ces mesures viendront compléter les mesures effectuées par le service des canaux de la Ville de Paris. Ceci permettra de préciser les taux de mortalité, de sédimentation des BIF dans le bassin en fonction de différents facteurs de contrôle environnementaux (température de l'eau, production algale, MOD...).

2. Modélisation hydrodynamique du bassin de la Villette

Le temps de transfert des contaminations depuis le rond-point des canaux a été estimé à 12 heures. La modélisation hydrodynamique tridimensionnelle du bassin de la Villette permettra de calculer de façon précise ce temps de transfert en fonction de différentes conditions hydrologiques et thermiques du bassin. Elle sera réalisée à l'aide du logiciel Telemac3D. Les apports par le canal de l'Ourcq à l'amont et les échanges thermiques avec l'atmosphère seront pris en compte. Les résultats de modélisation hydrodynamique fourniront les champs de vitesse et les valeurs de température de l'eau dans l'ensemble du bassin, et donc les temps de transfert et les conditions de viabilité des BIF. Afin de calibrer les paramètres du modèle hydrodynamique et de valider ses résultats, les séries de mesures hydrodynamiques indiquées au paragraphe 1 seront utilisées.

3. Modélisation déterministe du transport des contaminants microbiologiques

Une étude bibliographique approfondie des différentes approches de modélisation déterministe du transport des contaminants microbiologiques sera réalisée. Dans un premier temps, une modélisation du transport des BIF sera réalisée avec Telemac3D en les considérant comme des traceurs passifs, c'est-à-dire uniquement transportés par le mouvement de l'eau et soumis à un taux fixe de perte. Les conditions initiales seront fournies par les mesures télétransmises de la station d'alerte et de la ligne de capteurs associée (température, conductivité, turbidité).

Sera ensuite réalisé le couplage de Telemac3D avec une librairie de processus biologiques (AED2) décrivant la dynamique des BIF. En fonction des résultats obtenus et des connaissances apportées par la revue bibliographique, les équations décrivant la dynamique des BIF seront améliorées. La modélisation prédictive à court terme (2 jours) sera ensuite réalisée en utilisant comme forçage les prévisions météorologiques. Les concentrations mesurées en BIF dans les rejets et au droit des rejets fourniront des valeurs de niveau de contamination réalistes pour différents scénarii de modification du bassin versant d'apport.

4. Mise en œuvre de méthodes d'apprentissage automatique

Une étude bibliographique approfondie des méthodes d'apprentissage automatique basées sur des données massives et utilisées pour prédire les risques sanitaires sera réalisée. Seront en particulier étudiées les méthodes de type « réseaux de neurones artificiels » et « Random Forest ». Les méthodes les mieux adaptées seront ensuite mises en œuvre et comparées aux observations et aux résultats de la modélisation déterministe. Une modélisation prédictive à l'horizon de deux jours sera ensuite réalisée en utilisant comme variables prédictives celles identifiées par l'analyse des données massives.

5. Développement d'un prototype de système de surveillance de baignade en ligne

Une base de données évolutive et interrogeable en ligne sera constituée pour regrouper les différents types de mesures effectuées ainsi que les résultats de modélisation prédictive à court terme. Elle alimentera un système de surveillance en ligne consultable sur un site Internet ou sur une application mobile. Le système permettra la visualisation des mesures réalisées les jours précédents

et fournira des indicateurs prévisionnels de la qualité sanitaire de l'eau pour les 48 heures à venir, basés sur les résultats de la modélisation prédictive. Ce système n'a pas de vocation réglementaire mais apportera aux gestionnaires une aide à la décision pour la gestion de la baignade.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEEES

- Protocole de mise en œuvre d'une station de surveillance de baignade
- Modèle 3D couplé hydrodynamique et microbiologique, calibré et validé du bassin de la Villette
- Base de données évolutive et interrogeable en ligne
- Modèle d'apprentissage automatique de la prévision du risque sanitaire pour la baignade urbaine
- Prototype de système de surveillance de baignade en ligne (Internet et application mobile)

Le système développé a vocation à être adapté et déployé sur d'autres sites de baignade urbaine en eau douce présentant des caractéristiques similaires au bassin de la Villette.

CONTACTS

Brigitte Vinçon-Leite, LEESU, Ecole des Ponts (ENPC)

b.vincon-leite@enpc.fr



PRESENTATION ET OBJECTIFS GENERAUX

Le thème « **Diagnostic et optimisation des systèmes d'assainissement vis-à-vis des polluants et des micropolluants** » s'inscrit pleinement dans l'historique des activités de recherche menées par le programme OPUR. Il est structuré autour de deux volets que sont le diagnostic des ouvrages d'assainissement et l'exploitation.

Volet diagnostic

Depuis sa création, le programme OPUR s'intéresse en effet à la génération, au transport et à la gestion des contaminants dans les eaux urbaines par temps sec et par temps de pluie. Ces connaissances ont permis de poser un premier « diagnostic » sur le fonctionnement des réseaux. Après avoir étudié la macropollution (phases 1 et 2), les polluants prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau et certains polluants comme les polybromodiphenylethers ou les alkylphénols (phases 3 et 4), les chercheurs d'OPUR proposent au cours de cette phase d'élargir les actions de recherche à d'autres polluants émergents et à des nouvelles substances d'intérêt au sein des réseaux d'assainissement et le long du continuum urbain (des émissions domestiques aux rejets de station d'épuration).

Trois actions relatives au diagnostic ont été identifiées :

- Action R2.1 : Microplastiques dans les bassins versants anthropisés (J. Gasperi et B. Tassin)
- Action R2.2 : Inventaire et valorisation de données débit-qualité d'autosurveillance en entrée de station d'épuration (G. Chebbo et C. Joannis)
- Action R2.3 : Polluants émergents dans le continuum urbain (R. Moilleron et A. Bressy)

Ces actions permettront de mieux connaître la variabilité des concentrations et des flux de macropollution et des relations entre qualité des eaux usées et débit (R2.2), mais également d'apporter des connaissances sur les flux de débris plastiques (R2.1) et de biocides (R2.3) à l'échelle de l'agglomération parisienne par temps sec et par temps de pluie pour identifier des leviers d'actions conduisant à leur réduction. L'originalité dans cette phase est de proposer une réflexion partagée entre chercheurs et opérationnels pour l'identification de nouvelles substances d'intérêt.

Volet optimisation

Ce second volet vise à optimiser le fonctionnement des ouvrages d'assainissement soit en évaluant les performances et limites de nouveaux procédés de traitement soit en cherchant à mieux modéliser la qualité des flux de pollution à l'entrée d'une station d'épuration en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés plus à l'amont dans le réseau d'assainissement.

Deux actions relatives à l'optimisation ont été identifiées :

- Action R2.4 : Modélisation des flux de matières dans le réseau d'assainissement du SIAAP (G. Chebbo, C. Joannis, V. Rocher)

- Action R2.5 : Traitement tertiaire en station d'épuration – procédés d'oxydation des eaux résiduaires urbaines (J. Gasperi et J. Le Roux)

En amont de la station d'épuration, l'action proposée vise à développer et à évaluer des modèles prédictifs de la qualité des eaux à l'entrée d'une station d'épuration en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés en amont afin d'optimiser la gestion des stations d'épuration recevant ces eaux.

Au sein de la station d'épuration, il s'agira d'étudier 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). Ces travaux s'inscrivent pleinement dans la continuité des travaux d'OPUR suite du comportement des polluants prioritaires et d'autres substances le long des filières de traitement des eaux résiduaires urbaines (phase 3) et l'élimination de nombreux micropolluants prioritaires et émergents par charbon actif (phase 4, thèses R. Mailler, 2012-2015, thèse R. Guillosou, 2016-2019). Leur originalité réside à la fois dans la diversité des effluents et des procédés d'oxydation étudiés. Ils 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 et environnemental.



**THEME R2 : DIAGNOSTIC ET OPTIMISATION DES
SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT VIS-A-VIS DES
POLLUANTS ET DES MICROPOLLUANTS**

**ACTION R2.1 : MICROPLASTIQUES DANS LES BASSINS VERSANTS
ANTHROPISES**

CONTEXTE

Depuis les années 1950, la production mondiale de plastique est passée de 1,7 à 335 millions de tonnes en 2016 (PlasticsEurope, 2017). Parallèlement, la présence de déchets plastiques dans les milieux naturels s'est accrue sur l'ensemble de la surface du globe, tant sur les continents que dans les océans. Paradoxalement, alors que des estimations statistiques à l'échelle mondiale évaluent les flux vers les océans entre 1 et 10 millions de tonnes annuellement, les stocks de plastiques à la surface des océans ne sont estimés qu'à quelques centaines de milliers de tonnes. Cette pollution émergente a été largement médiatisée après la découverte de zones d'accumulations des déchets dans les gyres océaniques (Gasperi et al., 2018).

Plus récemment et suite aux études menées sur les débris plastiques macroscopiques, une pollution microscopique a été mise en évidence, et le terme de microplastiques est apparu (Arthur et al. 2009). Ces derniers sont définis comme des débris plastiques dont la taille varie entre quelques dizaines de μm et 5 mm. La problématique environnementale liée aux microplastiques est de deux ordres ; le premier est relatif aux interactions avec les micropolluants organiques (Teuten et al. 2007) et le second à leurs impacts écotoxicologiques (Derraik 2002).

Des premiers travaux ont été menés dès la fin des années 2000 en milieu marin à la fois sur la dynamique et le devenir des microplastiques (Barnes et al. 2009). Ces travaux témoignent de la contamination généralisée du milieu marin, des plages ou sédiments ou de l'impact de ces débris sur les organismes aquatiques mais n'ont pas permis de cerner l'origine des débris plastiques, les processus de fragmentations ou plus généralement leur impact sur les écosystèmes. Si le milieu marin commence à être documenté, les connaissances sur le milieu continental sont plus lacunaires.

OBJECTIFS ET METHODE

Conscient du manque de données sur les milieux continentaux et sur les bassins versants urbains, le LEESU a initié dès 2014 un projet sur les microplastiques à l'échelle du bassin versant de la Seine. Après une première thèse sur le sujet qui a permis 1) de développer des méthodes de séparation et d'analyse des microplastiques dans les eaux urbaines et 2) d'apporter des premiers éléments sur la contamination des eaux urbaines (Rachid Dris, 2013 – 2016), plusieurs objectifs sont visés au cours de la phase 5 du programme OPUR.

Le premier est d'ordre méthodologique. Si les protocoles développés permettent d'analyser des microplastiques jusqu'à 50 μm , de nouveaux protocoles pourraient être développés pour descendre en taille. Suite à l'acquisition d'un IRTF (spectroscopie infra-rouge), certains développements méthodologiques seront nécessaires pour une caractérisation des microplastiques plus aisée. La question des particules de pneus se pose également. Si elle est abordée, une méthodologie spécifique est nécessaire.

Le second objectif est d'approfondir les premières connaissances acquises sur les eaux pluviales et les rejets urbains de temps de pluie, à la fois pour les déchets plastiques de grande taille mais également les microplastiques. Une partie de la thèse de Robin Treilles (2017 – 2020), étudiant-

fonctionnaire de l'ENTPE, se focalisera plus spécifiquement sur cette question. Pour les eaux pluviales, en collaboration avec le CG94, les eaux arrivant au bassin de Sucy seront considérées. Pour les RUTP, des analyses seront menées sur le déversoir d'orage de Clichy, en collaboration avec le SIAAP.

Enfin, le travail initié sur les flux de débris plastiques (des macro- aux micro-plastiques) à l'échelle de la région Île-de-France sera poursuivi. Les flux urbains de plastiques, mais aussi la circulation des déchets plastiques à l'échelle de l'agglomération urbaine et les facteurs qui la régulent, seront étudiés. Pour cela, le métabolisme urbain des matières plastiques sera analysé en recherchant l'ensemble des sources et flux de plastiques, et également les « fuites », c'est à dire les flux vers l'environnement, en dehors du système de gestion des déchets, recyclage compris.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Les résultats attendus de la thèse ont pratiquement déjà été énoncés dans les objectifs. Ce projet est sur une question environnementale nouvelle d'importance, localement à l'échelle d'un environnement très impacté par le milieu urbain, et plus généralement en liaison avec l'impact sur le milieu marin des microplastiques. Ce travail devrait pouvoir apporter des éléments de réponses méthodologiques et d'obtenir une vision assez pertinente des flux et sources de débris plastiques de la ville et vers les milieux récepteurs aquatiques.

CONTACTS

Bruno Tassin (Leesu) : tassin@enpc.fr

Johnny Gasperi (Leesu) : gasperi@u-pec.fr



THEME R2 : DIAGNOSTIC ET OPTIMISATION DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT VIS-A-VIS DES POLLUANTS ET DES MICROPOLLUANTS

ACTION R2.2 : INVENTAIRE ET VALORISATION DE DONNEES DEBIT-QUALITE D'AUTOSURVEILLANCE EN ENTREE DE STATION

CONTEXTE

En dehors de quelques bassins versants expérimentaux (quai et Clichy à Paris, Ecully à Lyon) pour lesquels de riches bases de données ont été constituées au fil des années et des travaux de recherche, on sait assez peu de choses sur la variabilité des concentrations et de flux et sur les relations entre débit et qualité, et plus généralement sur la spécificité du temps de pluie par rapport au temps sec, que ce soit en réseau unitaire ou même en réseau séparatif eaux usées.

Par ailleurs l'autosurveillance des stations d'épuration est opérationnelle depuis de nombreuses années et comporte des bilans 24 h MES-DCO en entrée avec une fréquence hebdomadaire (pour les stations recevant plus de 33 000 eh) à journalière (pour les stations recevant plus de 330 000 eh). Ces données sont en partie centralisées dans le système d'information SANDRE et divers autres outils de « bancarisation » sont également utilisés (Autostep...). En complément à l'autosurveillance réglementaire certaines stations disposent probablement de mesure en continu réalisées à des fins d'exploitation. Toutes ces données doivent pouvoir être valorisées pour obtenir une vue plus générale du fonctionnement des réseaux de collecte en temps sec et en temps de pluie.

.

OBJECTIFS ET METHODE

On se propose dans une première phase d'inventorier auprès des agences de l'eau les données potentiellement disponibles, puis de vérifier leur accessibilité effective et leur forme.

On recherchera en particulier auprès des exploitants les données qui pourraient être archivées à un pas de temps infra journalier.

On se limitera dans un premier temps à l'agence Seine-Normandie, mais la démarche pourra être généralisée ultérieurement.

Dans une deuxième phase on sélectionnera un échantillon de stations de taille notable, par exemple > 100 000 eh (23 en Seine Normandie) et on constituera une base de données à 24h, et à pas de temps plus fin si disponible, incluant débit entrant (et surversé au point A3 si disponible), et flux de DCO et MES, le cas échéant conductivité et turbidité, que l'on complétera par des données pluviométriques.

Dans une troisième phase on exploitera cette base de données pour extraire des informations du type :

- Débits et Concentrations et flux moyens journaliers de temps sec et dispersion
- Débits et concentrations et flux moyens journaliers par tranche de hauteur précipitée et dispersion
- Corrélations entre débits, concentration et précipitations

- Pour les données à pas de temps plus fin les mêmes types de paramètres seront calculés à une échelle plus fine.

On obtiendra ainsi une vue d'ensemble sur les données potentiellement disponibles, sur les modalités de leur exploitation, et des résultats statistiques sur l'impact des temps de pluie sur la qualité des effluents collectés.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEES

Les résultats attendus permettront d'obtenir une vue d'ensemble sur les données potentiellement disponibles, sur les modalités de leur exploitation et des résultats statistiques sur la variabilité des concentrations et des flux et sur les relations entre débit et qualité, et plus généralement sur la spécificité du temps de pluie par rapport au temps sec, que ce soit en réseau unitaire ou même en réseau séparatif eaux usées.

CONTACTS

Ghassan Chebbo (Leesu) : ghassan.chebbo@enpc.fr

Claude Joannis (.....): claudio.joannis@wanadoo.fr



THEME R2 : DIAGNOSTIC ET OPTIMISATION DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT VIS-A-VIS DES POLLUANTS ET DES MICROPOLLUANTS

ACTION R2.3 : POLLUANTS EMERGENTS DANS LE CONTINUUM URBAIN

CONTEXTE

Deux directives encadrent les rejets de substances dangereuses dans le milieu aquatique : la directive 76/464/CEE du 4 mai 1976 et la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000, dite Directive cadre sur l'eau (DCE). La déclinaison à l'échelon français des objectifs de ces textes communautaires s'est traduite, en 2002, par la mise en œuvre de l'Action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (3RSDE) par les installations classées, puis la démarche a été étendue aux stations de traitement des eaux usées (STEU) en 2004. Cette première phase a montré que « les agglomérations d'assainissement émettent de façon non négligeable, et parfois significative, vers les milieux aquatiques, des substances dangereuses et dangereuses prioritaires au sens de la directive cadre sur l'eau (DCE). Elle a également permis de mettre en évidence le relatif manque de connaissances des émissions de certains micropolluants par ces agglomérations » (Note technique du 16 août 2016).

La deuxième phase de l'action RSDE a ensuite ciblé le suivi sur les installations identifiées comme à enjeux en termes de rejets aqueux avec la mise en place d'une surveillance réglementaire des émissions de certaines installations classées pour la protection de l'environnement (circulaire du 5 janvier 2009) et des STEU (circulaire du 29 septembre 2010). Enfin, la note technique du 16 août 2016 constitue une feuille de route pour les collectivités comprenant deux phases :

- une phase de recherche (eaux brutes et eaux traitées) qui permet d'identifier les micropolluants à enjeu pour la STEU concernée. Elle servira aussi de référence pour quantifier les réductions réalisées ;
- une phase de diagnostic à l'amont de la STEU qui permet une meilleure compréhension des sources d'émissions et une identification des actions de réduction pertinentes.

Les STEU visées par cette note sont celles ayant une capacité nominale supérieure ou égale à 600 kg/j de DBO₅ exception faite des STEU relevant de la rubrique 2752 et de celles dont les eaux usées traitées sont évacuées par infiltration dans le sol.

Pour réduire l'émission de micropolluants, il est demandé aux collectivités de réaliser un diagnostic vers l'amont de la station dès lors que des micropolluants sont identifiés comme significativement présents dans les eaux brutes ou les eaux traitées de la STEU. Les investigations à mener ciblent bien souvent, en priorité, les eaux usées non domestiques et donc l'origine industrielle et artisanale des micropolluants. En effet, parmi les sources de contamination potentielles, les rejets industriels sont souvent considérés comme le premier vecteur de la pollution en milieu urbain. Cependant il existe des contextes pour lesquels le bassin versant considéré présente une densité de population importante et s'avère faiblement industrialisé. Depuis 2009, dans le cadre des phases précédentes d'OPUR, en s'appuyant sur le cas de l'agglomération parisienne, représentatif de ce type de situation (Bergé et al., 2013), une comparaison de la contamination des eaux usées d'origines industrielles et domestiques a été établie pour trois familles de micropolluants : les alkylphénols et les phtalates (Bergé, 2012 ; Deshayes, 2015), relevant de la liste de la note technique du 16 août 2016, et les parabènes, micropolluants émergents d'intérêt (Geara-Matta, 2012 ; Zedek, 2016)). L'importance des sources domestiques a été démontrée pour les phtalates et les alkylphénols. De plus, les concentrations en alkylphénols, phtalates et parabènes ont été mesurées dans les principaux

émissaires du réseau d'assainissement unitaire de l'agglomération parisienne en 2010 (Bergé, 2012 ; Geara-Matta, 2012). Ces concentrations représentent les niveaux de référence de l'imprégnation des eaux usées résiduelles urbaines pour ces micropolluants puisqu'il s'agissait des premières études fournissant des informations sur ces molécules. Les mêmes émissaires ont été de nouveau étudiés en 2015 : alkylphénols et phtalates par Deshayes (2015), et parabènes par Zedek (2016). Depuis 2010, les concentrations en parabènes ont diminué d'un facteur compris entre 3,5 et 6 pour les parabènes. Pour les alkylphénols, les concentrations en nonylphénol sont 5 fois plus faibles alors que celles de l'octylphénol ont été divisées par 10 ; les niveaux relevés en 2015 sont désormais très souvent proches de la limite de quantification (0,17 µg/L). Pour la plupart des phtalates, les niveaux mesurés sont environ 5 fois plus bas en 2015.

Combiner les démarches utilisées pour le suivi des alkylphénols et phtalates dans la phase 4 du programme OPUR, d'une part, et les parabènes dans le projet Cosmet'eau, d'autre part, contribuerait à établir une base de données pour de nouvelles substances d'intérêt pour lesquelles il existe aujourd'hui peu d'information. Cependant au regard des moyens lourds qui doivent être mis en œuvre pour une telle approche, il s'avère primordial de développer une stratégie de priorisation des molécules à suivre en amont.

OBJECTIFS

- Dans le cadre d'une démarche concertée avec les partenaires opérationnels d'OPUR, prioriser de nouveaux contaminants pour lesquels des informations sont nécessaires.
- Mieux connaître les sources domestiques de certains polluants (comme les biocides par exemple) pour identifier des leviers de réduction des émissions dans une dynamique de réduction à la source.

METHODOLOGIE ET PLANNING

METHODOLOGIE

1. Émissions de biocides

Notre objectif est d'avoir une meilleure connaissance des flux de biocides à l'échelle de l'agglomération parisienne :

- Par temps de pluie (thèse Claudia Paijens) action débutée en octobre 2016 dans le cadre de la phase intermédiaire OPUR4-5
 - Identification des familles de biocides contenus dans les matériaux de construction et de leurs sources d'émission
 - Caractérisation des rejets urbains de temps de pluie :
 - Développement d'une méthode analytique par UPLC-MS/MS
 - Réalisation de campagnes d'échantillonnage (pluie, pluvial, DO, STEU)
 - Evaluation des flux issus du bâti et rejetés au milieu récepteur, comparaison avec les flux véhiculés en Seine avant et après l'agglomération
 - Campagnes d'échantillonnage en Seine
- Par temps sec (financement de thèse ou post-doc à trouver), en s'appuyant sur l'étude des eaux grises, des eaux usées domestiques et des STEU.

Il s'agit *in fine* d'évaluer les transferts vers la Seine et d'identifier des leviers d'actions opérationnels qui pourraient réduire ces transferts.

2. « Identification de nouvelles substances d'intérêt » - démarche partagée

- Réflexion partenaires/Leesu pour le choix de nouvelles molécules à suivre :

- première étape : constitution d'un groupe de travail qui porterait un regard critique sur les méthodes de priorisation existantes et les données acquises dans les différentes collectivités
- deuxième étape : sur la base des critères définis lors de la première étape établir une liste de molécules à suivre afin de réaliser un diagnostic à l'échelle de l'agglomération parisienne pour une famille (comme les alkylphénols dans les phases précédentes) ou un type d'utilisation (plastiques, détergents, retardateurs de flammes ou biocides) en se concentrant sur les origines industrielles et domestiques (sous-action 3.).
- En lien avec l'action T1 : *nouvelles méthodes de caractérisation des micropolluants : analyses par screening qualitatif et écotoxicologie* et le thème O1 : *observation des micropolluants dans les eaux urbaines*, identifier de nouvelles molécules d'intérêt via le screening non ciblé puis établir les niveaux de référence pour ces molécules.

3. Continuum urbain (du foyer aux rejets) de nouvelles substances d'intérêt

En s'appuyant sur les démarches développées pour le suivi des alkylphénols et phtalates dans la phase 4 du programme OPUR, d'une part, et les parabènes dans le projet Cosmet'eau, d'autre part :

- Acquérir des connaissances nouvelles pour les molécules retenues dans la sous-action 2. « *Identification de nouvelles substances d'intérêt* » ;
- Prévoir un développement analytique si la sous-action 2 aboutit à choisir de nouvelles molécules pas encore intégrée au panel de molécules suivies dans les phases précédentes d'OPUR.

	Échantillons
Eaux grises (10 x 5)	50
Eaux industrielles Industrie(s) ou ZI à définir	20
Émissaires 1/mois pendant 1 an	12
Rejets STEU 1/mois pendant 12 mois	12
Déversoirs d'orage 10 événements	10
Développements analytiques	20
Option (1) Campagnes STEU (x3)	15
Total (hors option)	124
Total (avec option)	139

L'identification du bassin versant sur lequel les investigations pourraient se dérouler doit se faire en concertation avec les partenaires opérationnels d'OPUR afin d'optimiser (le cas échéant avec d'autres actions) les moyens logistiques qui devront être déployés pour atteindre nos objectifs : engagement de la collectivité, métadonnées disponibles, accessibilité des différents compartiments étudiés, robustesse des préleveurs, etc.

PLANNING

	2019				2020				2021				2022				2023			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Action 1	<- Temps de pluie ->																			
					<- Temps sec ->															
Action 2																				
Action 3																				

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEES

- Avoir une meilleure connaissance des flux de biocides à l'échelle de l'agglomération parisienne par temps sec et par temps de pluie pour identifier des leviers d'actions conduisant à leur réduction ;
- Développer une méthode de priorisation des nouvelles substances d'intérêt en s'attachant à développer des critères de priorisation facilement accessibles ;
- A l'échelle d'un bassin versant urbain, établir une base de données des niveaux de contamination de différentes eaux urbaines (eaux grises, eaux industrielles et artisanales, émissaires, rejets de station d'épuration, déversoirs d'orage, eaux pluviales strictes) pour de nouvelles substances d'intérêt.

CONTACTS

Adèle Bressy : adele.bressy@enpc.fr

Régis Moilleron : moilleron@u-pec.fr



THEME R2 : DIAGNOSTIC ET OPTIMISATION DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT VIS-A-VIS DES POLLUANTS ET DES MICROPOLLUANTS

ACTION R2.4 : MODELISATION DES FLUX DE MATIERES DANS LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT DU SIAAP

CONTEXTE

Parmi les innovations dans lesquelles s'est engagé le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne), on trouve la gestion en temps réel de son réseau de transport des eaux résiduaires urbaines. Ce système, lancé au cours des années 80, en même temps que se développaient ceux des départements de la petite couronne parisienne et celui de la ville de Paris, a trouvé sa pleine capacité avec des évolutions majeures introduites au cours des années 2000. Baptisé SCORE à l'origine, il est devenu MAGES (Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP) après la mise en œuvre de ces évolutions. Cet outil informatique de simulation régule 24h/24h le réseau d'assainissement de l'agglomération parisienne et assure une gestion optimisée de l'ensemble du transport des effluents du SIAAP vers 6 usines de traitement (dont Seine Aval, 6,5 millions équivalent-habitants). Ce système recueille les informations des différents acteurs de l'assainissement (communes, syndicats de communes et conseils généraux), intègre les prévisions de Météo-France, analyse ces données en temps réel, élabore des scénarios, au cas par cas, en fonction de la disponibilité des ouvrages et de la quantité d'eau qui circule dans les 440 km du réseau du SIAAP et informe les exploitants locaux et leur fournit des éléments de décision.

Demain, avec l'augmentation des charges polluantes à traiter, la réduction des capacités de dilution de la Seine, un système d'assainissement plus complexe et des usines plus réactives, les contraintes qui s'exerceront sur la gestion de l'assainissement seront de plus en plus fortes. Le « droit à l'erreur » va diminuer et il faudra tendre vers une exploitation « zéro défaut ». Pour faire face à ces évolutions, il apparaît important aujourd'hui de poursuivre dans cette voie de l'innovation avec le développement d'outils intelligents d'aide à l'exploitation. Il s'agit de passer d'une gestion de flux hydrauliques à une gestion intégrée du système réseau d'assainissement-STEP-rivière qui permettra d'une part de limiter l'empreinte économique et environnementale du traitement des eaux usées et d'autre part d'adapter la qualité du rejet du système d'assainissement en fonction de l'état de la rivière et ainsi atteindre les objectifs réglementaires (bon état physico-chimique des masses d'eau superficielle - Directive Cadre sur l'Eau).

En ce sens, Le SIAAP s'intéresse à la modélisation des compartiments rivière, STEP et réseau, à leur couplage et à leur utilisation en temps réel. Dans le cas précis du réseau d'assainissement, le modèle MAGES fournit déjà des prédictions hydrauliques. Le SIAAP souhaite donc lui greffer un module de prédiction de la qualité des eaux, et de l'alimenter à partir de mesures amont récoltées à haute fréquence.

OBJECTIFS ET METHODE

L'action de recherche s'intéresse au compartiment « réseau d'assainissement du SIAAP ». Elle vise à développer et à évaluer des modèles prédictifs de la qualité des eaux à l'entrée d'une station d'épuration en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés plus à l'amont dans le réseau d'assainissement.

Le réseau d'assainissement exploité par le SIAAP étant très vaste, il est proposé de travailler dans cette action sur une partie du réseau ouest, soit principalement les cinq émissaires alimentant la plus grosse station d'Ile-de-France : Seine Aval (SAR, SAN, CAA, CAB et SDA, voir Figure 1). La Figure 1 illustre également les points prévus sur ces cinq émissaires pour l'installation de stations de mesure en continu. La station de La Frette située juste en amont de SAV existe depuis un certain moment déjà. Celle de Clichy, couvrant le CAA et le CAB, est en phase de réception/validation. Les mesures réalisées à cette station sont la conductivité, la turbidité, le carbone organique dissout, l'azote ammoniacal, le pH et la température. Les deux autres stations demeurent pour l'instant en attente de la validation de Clichy et devraient se baser sur un modèle similaire, mais potentiellement sans mesure de COD et NH_4^+ si ces deux variables peuvent être estimées à partir de la conductivité. Le but de cette première étude sera donc de simuler la qualité des eaux à La Frette en fonction des débits et des qualités mesurées aux trois autres stations.

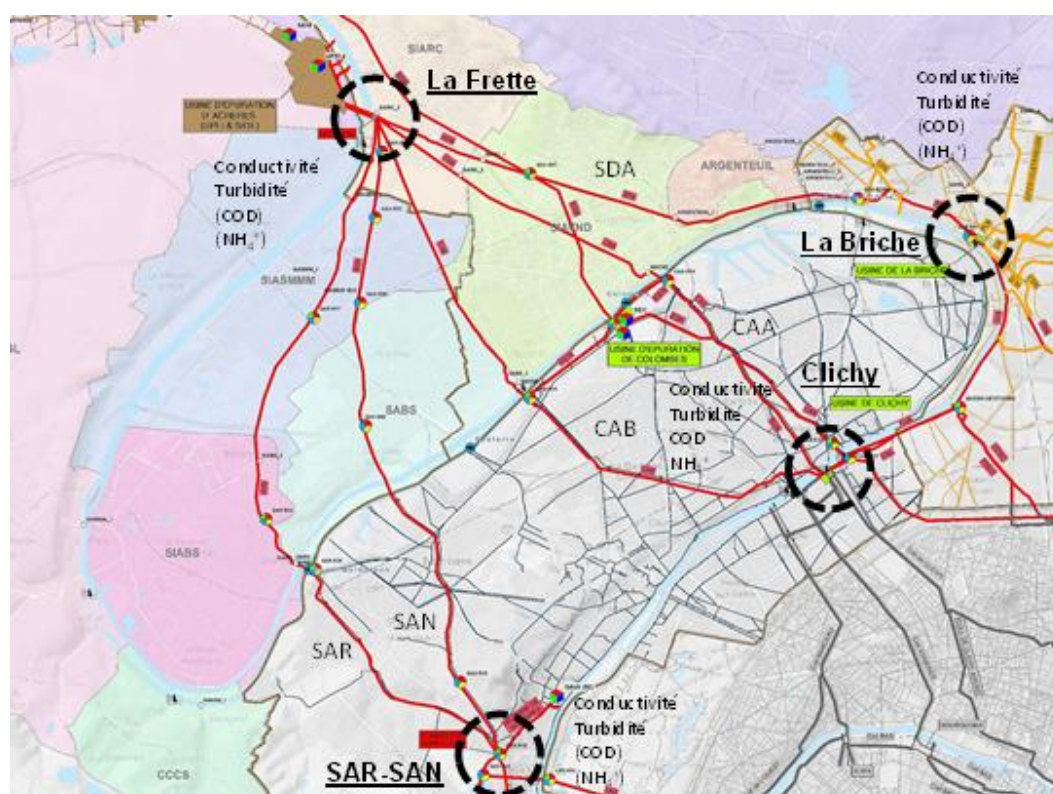


Figure 1 : Plan simplifié du réseau ouest, focus sur SAV et stations de mesure planifiées

Cette action s'organise autour de trois parties.

La première partie sera une analyse hydraulique du fonctionnement des émissaires, impliquant un recueil de données caractérisant les débits amont, et le cas échéant le forçage aval (stratégie de pompage). Elle débouchera sur le développement d'un modèle d'advection simple pour calculer les temps de transfert dans différents contextes et fournir une prédiction de base de la qualité des eaux à la Frette en fonction des débits et des qualités amont. Pour ce faire on identifiera au préalable la ou les échelles de temps nécessaires à la gestion de la station d'épuration.

La deuxième partie consiste en une exploitation statistique des données de flux polluants pour mieux comprendre le fonctionnement global du système. Dans cette partie, nous quantifierons les flux de contaminants et leurs variabilités, et nous analyserons les relations possibles entre les différents paramètres étudiés. On cherchera également s'il existe des échelles de temps pour lesquelles le bilan entrée-sortie est conservatif. Enfin on analysera les écarts entre les résultats

simulés par advection et les valeurs observées pour évaluer l'importance des différents processus physico-chimiques lors du transfert dans le réseau.

En fonction des résultats obtenus, deux approches d'amélioration de la prédiction seront envisagées. La première consiste à modéliser les phénomènes de transport, de sédimentation, de remise en suspension et même voire de dégradation biologique affectant les contaminants solubles et particulaires au sein des différentes parties des émissaires de SAV. Une seconde approche, conceptuelle ou statistique pourra également être évaluée, en cherchant à simuler la qualité à la sortie du système à partir des données d'entrée sans se préoccuper directement des processus en jeu. Le développement et l'évaluation de ces approches fera l'objet de la troisième partie de cette étude.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Cette action permettra de développer et d'analyser les approches de modélisation les mieux adaptées pour prédire la qualité de l'eau à la Frette et optimiser la gestion de la station d'Achères en fonction des flux d'eau et de contaminants mesurés au niveau de trois points stratégiques du réseau d'assainissement du SIAAP (La Briche, Clichy et SAR-SAN).

CONTACTS

Vincent Rocher (SIAAP) : vincent.rocher@siaap.fr

Ghassan Chebbo (Leesu) : ghassan.chebbo@enpc.fr

Claude Joannis : claud.joannis@wanadoo.fr



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_2O_2). 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_3/H_2O_2 , UV/ H_2O_2).
- 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 RETOMBÉES

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



CONTEXTE

Les travaux réalisés dans les phases précédentes d'OPUR font émerger plusieurs questions liées à une caractérisation globale des micropolluants et de leurs effets : quelles sont les molécules émergentes et d'intérêt pour de futurs travaux ? Les eaux usées peuvent-elles être le reflet des pratiques des citoyens et consommateurs ? Quels sont les impacts environnementaux et sanitaires des micropolluants ? Quel est le devenir des micropolluants dans les systèmes d'assainissement ?

Les analyses de type non-ciblé, en particulier par spectrométrie de masse haute résolution, sont de plus en plus employées dans tous types d'études nécessitant l'identification précise de molécules. L'identification de molécules inconnues peut en effet être requise pour :

- mieux connaître la diversité de micropolluants présents dans les eaux (ex. dans les eaux usées domestiques et les eaux pluviales), les sédiments, les boues de station d'épuration, ou encore les molécules adsorbées sur les particules de types microplastiques. De nombreux travaux ont été réalisés pour l'identification de micropolluants dans les rivières (Merel et al., 2018; Ruff et al., 2015; Schwarzbauer and Ricking, 2010) mais les travaux sur les eaux usées et en particulier les phases particulières sont plus rares ;
- mettre en évidence l'émergence de molécules inhabituelles dans les eaux usées et par conséquent de nouvelles pratiques de consommation. La détection de molécules émergentes au cours du temps par ce type de technique analytique a fait récemment l'objet de plusieurs travaux (Plassmann et al., 2018, 2016) mais n'a pas encore été appliquée à des eaux urbaines (ou naturelles) ;
- caractériser le devenir des micropolluants dans les réseaux d'assainissement, les ouvrages et les filières de traitement (ex. biodégradation en STEP ou en ouvrage de gestion des eaux de ruissellement) et identifier les processus associés. Ce type de méthode a été utilisé avec succès ces dernières années pour identifier des molécules d'intérêt et leur devenir dans les procédés de traitement (Bergé et al., 2018; Merel et al., 2017) ;
- déterminer les polluants pouvant entraîner les impacts les plus importants sur les milieux. A ce titre, l'association de ce type d'analyse chimique avec des méthodes biologiques de caractérisation (bio-essais) s'avère nécessaire.

Les outils d'écotoxicologie développés au Leesu sur larves de poissons zèbre se sont appuyés pour l'instant sur 3 méthodologies : 1) l'approche classique par molécule individuelle en concentrations variables, relativement élevées, 2) l'approche par mélange de molécules (« cocktail ») en concentrations relativement élevées et 3) une approche par mélange de molécules en concentrations « environnementales ». L'ambition de l'action R2.6 est d'appliquer à terme les bio-essais développés à des échantillons complexes (type ERU).

OBJECTIFS

Les objectifs de cette action sont :

- 1) Accompagner la mise en place de l'« Observatoire des micropolluants » par le développement d'une méthodologie adaptée aux analyses non-ciblées régulières visées et le traitement des données obtenues (cf stratégie et premières investigations du thème O2).

- 2) Développer une méthode d'analyse non-ciblée pour les phases particulières, qui sera alors appliquée à la caractérisation des micropolluants associés aux microplastiques et aux archives sédimentaires de chambres à sables (rétroobservation du thème O2).
- 3) Former un support analytique pour plusieurs actions et thèmes d'OPUR, basé sur les nouvelles méthodes de caractérisation des micropolluants par analyse en spectrométrie de masse haute résolution associées aux analyses écotoxicologiques. La complexité des méthodologies employées pour le traitement des données visant à l'identification de molécules inconnues sera palliée par l'application de ces méthodes de manière commune à des problématiques diverses.

Les méthodes analytiques développées au Leesu seront donc appliquées aux thèmes et actions suivantes :

- Thème O2 : Observation dans les eaux urbaines (eaux usées et archives sédimentaires)
- R2.1 : Microplastiques dans les bassins anthropisés
- R2.3 : Polluants émergents dans le continuum urbain
- R2.5 : Traitement tertiaire en station d'épuration : procédés d'oxydation des ERU
- R3.4 : Biodégradabilité des micropolluants organiques dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales

L'ambition est d'associer le plus possible la caractérisation par screening qualitatif et l'écotoxicologie pour :

- mutualiser les efforts à fournir au niveau des étapes de collecte et de préparation des échantillons
- maximiser les informations obtenues et coupler les approches pour obtenir une vision globale des micropolluants présents dans les échantillons et de leur impact toxique. Les données d'analyse chimique et de toxicité seront stockées conjointement dans une démarche d'observation de long terme pour permettre la comparaison avec d'autres échantillons.

Cette démarche sera en particulier développée avec la plus grande ampleur dans le thème O2.

METHODOLOGIE ET PLANNING

Cette action s'articulera autour de 3 blocs :

- 1) La mise en place de l'« Observatoire des micropolluants » (thème O2) :
 - a. Développement d'une stratégie d'analyse non-ciblée adaptée (fréquence des prélèvements pour observer des évolutions pertinentes, injection directe ou extraction préalable) et de traitement des données obtenues (tests statistiques les plus pertinents pour identifier des tendances de long terme). Cette phase de définition stratégique se déroulera la première année, conjointement avec la finalisation de la méthode opérationnelle de suivi en phase dissoute en cours de développement.
 - b. Suivi sur eaux usées brutes pendant un an à des fréquences variables (à partir de la deuxième année, avec le support du doctorat mené dans le projet associé WaterOmics) puis sur 3 ans (cf thème O2). La robustesse et la sensibilité des outils analytiques sera également évaluée sur les eaux usées brutes au cours de la phase d'initiation de l'Observatoire (année 2), ainsi que la complémentarité des approches toxicité et screening chimique.
- 2) Le développement d'une méthode d'analyse non-ciblée en phase particulière (microplastiques et archives sédimentaires pour la rétroobservation) :
 - a. Ce développement sera initié à partir de la deuxième année
 - b. La rétroobservation sur archives sédimentaires sera alors menée dans le cadre d'un doctorat prévu dans l'action 3 du thème O2.
- 3) Le support analytique d'autres thèmes et actions (Thèmes 1 et 3, R2.1, R2.3, R2.5)

- a. Thèmes 1 et 3 : Caractérisation des eaux pluviales et de ruissellement à l'exutoire des réseaux et dans les ouvrages de gestion amont, étude de la variabilité temporelle et inter-sites. Dans l'action R3.4 : identification des produits de dégradation des molécules étudiées au sein des ouvrages de gestion des eaux pluviales, élaboration de profils d'évolution de ces produits au cours des cinétiques de biodégradation à partir des expériences de cinétiques de biodégradation en batch (année 1) puis des expériences en colonnes (année 2). Comparaison des empreintes et de l'évolution de la toxicité entre l'entrée et la sortie des colonnes de sols.
- b. R2.1 : Analyse des micropolluants associés aux microplastiques et expérimentations de sorption et désorption de micropolluants sur les microplastiques
- c. R2.3 : Suivi de la formation de sous-produits de dégradation des polluants étudiés dans le continuum urbain. Les expérimentations seront menées en conditions contrôlées en laboratoire (simulation de la dégradation des micropolluants ciblés - biocides) puis en conditions réelles dans les eaux urbaines, dans le cadre de la thèse prévue. Les matrices étudiées dans l'action R2.3 (eaux grises, eaux usées domestiques, eaux usées industrielles...) seront analysées pour déterminer les différences caractéristiques entre ces matrices.
- d. R2.5 : Identification de sous-produits d'oxydation et métabolites de micropolluants (composés pharmaceutiques) dans les procédés d'oxydation étudiés pour le traitement tertiaires des ERU. Comparaison d'empreintes globales pour estimer l'efficacité des procédés de traitement. Caractérisation fine des familles de micropolluants organiques par fractionnement, dans le cadre du projet associé *WaterOmics*, en association avec la toxicité. Les outils d'écotoxicologie permettront d'évaluer des matrices complexes, constituées notamment d'échantillons contrastés (avant/après traitement par oxydation) pour maximiser les différences entre les potentiels toxiques.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Les résultats obtenus dans cette action permettront de mieux connaître la diversité de micropolluants présents dans les différentes eaux urbaines et les phases particulières (peu étudiées par ces techniques jusqu'à présent). En lien avec le thème O2, l'observation de long terme permettra de mettre en évidence des molécules inhabituelles (réellement « émergentes ») dans les eaux usées et par conséquent de nouvelles pratiques de consommation. L'action apportera des outils analytiques qui seront utilisés dans plusieurs autres actions pour caractériser le devenir des micropolluants dans les réseaux d'assainissement, les ouvrages et les filières de traitement (ex. biodégradation en ouvrage de gestion des eaux pluviales) et identifier les processus associés.

CONTACTS

Julien Le Roux (Leesu) – julien.le-roux@u-pec.fr
Laure Garrigue-Antar (Leesu) – laure.garrigue-antar@u-pec.fr
Christophe Morin (Leesu) – ch.morin@u-pec.fr



INTRODUCTION

Après avoir été considérée au XIX^{ème} siècle comme un facteur de risque sanitaire qu'il fallait évacuer rapidement loin de la ville, puis au XX^{ème} siècle sous l'angle du risque hydrologique à maîtriser, la pluie reprend sa place de ressource naturelle à protéger et à valoriser dans les villes « eau-responsables » du XXI^{ème} siècle (IWA, 2016). Ce changement de paradigme vis-à-vis de la gestion des eaux pluviales se retrouve dans les concepts de « water sensitive urban design », « sustainable urban drainage » (Fletcher et al., 2015) et plus récemment « sponge cities » (Chan et al., 2018) qui se développent à l'international. Il s'agit en quelque sorte de rendre la ville « transparente » à la pluie (Chocat, 2014), afin de maintenir un bilan hydrologique et une qualité de l'eau proches de ce qu'ils seraient en l'absence d'urbanisation. Cela passe par la promotion d'une gestion des eaux de ruissellement à l'échelle de la parcelle, ou d'un ensemble de parcelles, dans des ouvrages diffus favorisant la rétention au plus près de la source, l'infiltration et/ou l'évapotranspiration.

Au cours de dernières années, de nombreuses collectivités ont inscrit dans leurs documents d'urbanisme des contraintes visant, au-delà de la seule régulation des débits admis dans le réseau collectif, à abattre par infiltration et/ou évapotranspiration la fraction des eaux de ruissellement correspondant aux pluies courantes (plan Paris Pluie par exemple). Au-delà de ces enjeux hydrologiques, des préconisations sont faites également pour favoriser la plurifonctionnalité des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement, leur intégration urbaine, et développer les cobénéfices retirés de ces modes de gestion alternatifs. La généralisation des infrastructures vertes de gestion à la source des eaux pluviales est ainsi considérée comme une solution prometteuse d'adaptation au changement climatique (Thomas and Cunha, 2017). Elle pourrait contribuer à atténuer la perte de biodiversité, à améliorer le confort thermique urbain et la qualité de vie.

Le déploiement efficace d'infrastructures vertes de gestion à la gestion se heurte cependant encore à plusieurs limites. Contrairement à d'autres pays plus avancés sur le sujet, il n'existe pas en France de guides techniques précis pour la conception et le dimensionnement de ces ouvrages permettant de garantir leur efficacité. Or les documents et résultats acquis à l'étranger ne sont pas toujours directement transposables au contexte français, du fait de différences de climat, de nature du sol ou de contexte organisationnel. Par ailleurs, les outils de modélisation utilisés pour la conception de ces ouvrages restent encore souvent inadaptés ou insuffisants pour répondre aux nouveaux enjeux. Plus généralement, les connaissances restent parcellaires sur certains processus affectant le bilan hydrique, tels que l'évapotranspiration, ou le devenir des polluants.

LA GESTION A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES DANS OPUR : BILAN DES AVANCEES ET NOUVELLES INTERROGATIONS

La gestion alternative des eaux pluviales urbaines a été questionnée dans l'observatoire OPUR à partir de sa phase 3, avec la thèse d'Adèle Bressy (Bressy, 2010). Il s'agissait alors d'évaluer l'intérêt des pratiques de rétention/régulation des débits ruisselés à l'échelle de la parcelle ou de l'ilot, pour la maîtrise des flux polluants. La réduction des volumes de ruissellement dans des dispositifs de gestion perméables et à ciel ouverts, est apparue comme un élément clef de maîtrise de la pollution diffuse liée au ruissellement urbain. Mais ces effets restaient très variables d'une réalisation à l'autre, suivant la nature des ouvrages, leur conception, leur dimensionnement. Les travaux de recherche développés dans OPUR4 ont permis d'avancer dans la définition des critères

hydrologiques à prendre en compte, dans le climat francilien, pour un abattement efficace des flux de ruissellement et de polluants associés. Ce travail de modélisation va être valorisé sous la forme d'un outil opérationnel d'aide au dimensionnement. La thèse de Damien Tedoldi (Tedoldi D., 2017) a pour sa part interrogé le risque de contamination du sol, voir le transfert vers le sous-sol, des polluants ainsi piégés. Elle a confirmé, par une approche couplant mesures sur le terrain et modélisation, dans le cas des métaux et HAP, l'accumulation des polluants sur une zone d'extension limitée (en surface et en profondeur) des ouvrages d'infiltration décentralisés. La thèse offre des perspectives intéressantes en termes d'orientation des pratiques de conception et de maintenance des ouvrages d'infiltration à la source. Un guide technique est en cours de préparation. Enfin, les travaux menés dans le cadre des thèses de Kelsey Flanagan (Flanagan, 2018) et Tala Kanso (en cours) se sont intéressés à l'efficacité d'un ouvrage de biorétention, permettant de dépolluer par filtration au travers d'une couche de sol végétalisée, des eaux de ruissellement d'une voirie à fort trafic. Ils soulignent les perspectives intéressantes qu'offre ce type d'ouvrage pour la gestion d'eaux de ruissellement pouvant présenter des charges importantes en matières en suspension et en micropolluants, mais aussi son efficacité limitée pour l'abattement de la pollution dissoute, et le risque d'émission de micropolluants par les matériaux de construction de la structure (étanchéité, drain, ...).

Si les travaux menés dans OPUR4 ont permis des avancées notables sur certains aspects, ils ont également fait émerger de nouvelles interrogations.

Concernant le fonctionnement hydrologique, les travaux de recherche passés mettent en évidence l'insuffisance des approches de modélisation actuelles pour la description de la composante évapotranspiration. Les travaux d'OPUR4 se sont concentrés sur des types d'ouvrages où cette composante restait mineure. Or, dans un contexte d'adaptation au changement climatique, la promotion de l'évapotranspiration revêt des enjeux croissants en milieu urbain. Une meilleure évaluation de l'importance de ce processus s'avère indispensable. La mesure et la modélisation correcte de cette composante constituent des verrous importants à lever pour avancer dans l'évaluation de l'efficacité hydrologique et des co-bénéfices associés à certains ouvrages de gestion à la source tels que revêtements perméables, jardins de pluie ou noues filtrantes étanchés, jardinières, boîtes à arbres,... Plus largement, le bilan hydrique des ouvrages de type biofiltration (qui peuvent être étanchés ou non, drainés ou non drainés, implantés dans des contextes pédologiques variés et avec des ratios surface d'apport / surface d'infiltration variés), aux échelles de temps de la saison et de l'année reste insuffisamment décrit. Des approches de modélisation adaptées à ces structures multicouches sont nécessaires.

Concernant les polluants, les travaux sur l'efficacité des ouvrages et sur le devenir des polluants interceptés se sont essentiellement concentrés sur la question des métaux et des hydrocarbures. Les données sur le comportement des micropolluants organiques restent encore trop limitées. Pour les polluants organiques, dont certains sont dégradables, la question du devenir des micropolluants interceptés dans le sol ou substrat se pose : quelle est l'importance du processus de biodégradation ? Permet-il de limiter la vitesse d'accumulation et d'augmenter la longévité de la couche filtrante ? La dégradation de ces micropolluants est-elle susceptible de libérer des métabolites plus mobiles ou plus toxiques ? Les processus de dégradation de la matière organique présente dans les ouvrages ne sont-ils pas susceptibles de remobiliser certains des micropolluants piégés ? La faible efficacité d'adsorption des métaux dissous pose par ailleurs la question de la spéciation de ces composés dans les eaux pluviales, et de leur éventuelle association à de la matière organique dissoute ou à des colloïdes, issus du ruissellement ou de l'ouvrage végétalisé.

OBJECTIFS DU THEME 3 « OUVRAGES DE GESTION A LA SOURCE »

Le thème 3 d'OPUR5 a pour finalité l'optimisation de la conception et de la gestion des ouvrages de contrôle à la source des eaux de ruissellement urbaines. Le focus est mis plus particulièrement sur les ouvrages faisant appel aux services écosystémiques d'un sol ou substrat végétalisé.

Il vise l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrologique des ouvrages de gestion à la source des eaux de ruissellement d'une part et sur le devenir des micropolluants piégés dans les substrats filtrants d'autre part. Il ambitionne également de proposer des outils de modélisation adaptés à la description de ces phénomènes.

Ce thème s'appuiera essentiellement pour le volet expérimental sur de l'acquisition de données en conditions contrôlées au laboratoire pour le devenir des polluants piégés, et sur de l'acquisition de données sur ouvrage pilotes en conditions contrôlées dans la mini ville climatique Sense-City pour le suivi du fonctionnement hydrologique. Ces données pourront être complétées par celles acquises sur le long terme sur le site de Compans.

Le second volet porte sur le développement et/ou l'évaluation de différentes approches de modélisation des transferts d'eau et de polluants dans les ouvrages.

STRUCTURATION DU THEME EN ACTIONS DE RECHERCHE

Le thème 3 est structuré en 5 actions de recherche

R3.1 – ModeLET - Modélisation de l'évapotranspiration à différentes échelles spatiales

(Action de recherche transversale entre le thème 3 et le thème 4 du fait des différentes échelles spatiales considérées)

Cette action vise à améliorer la modélisation du flux d'évapotranspiration, dans un objectif de mieux représenter le bilan hydrologique de zones urbaines et de pouvoir mieux prendre en compte ce flux dans des actions opérationnelles (conception d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales, aménagement urbain, conception et entretien des espaces verts).

R3.2 – Performance hydrologique des jardins de pluie : mesures en conditions contrôlées et modélisation pour une diversité de contextes

L'action R3.2 vise à établir de façon plus précise le bilan hydrologique d'ouvrages de type « biorétention » pour les pluies courantes et à analyser sa variabilité en fonction du type de conception (étanche ou non, drainé ou non, présence d'une couche de stockage sous le drain), des dimensions relatives de l'ouvrage, de la nature des matériaux le constituant. La fiabilité des modèles conceptuels intégrés dans les logiciels d'hydrologie urbaine pour représenter ce bilan hydrique sera par ailleurs évaluée.

R3.3 – Evaluation de la performance hydrologique des « Arbres de pluie »

Cette action exploratoire vise l'évaluation du potentiel offert par les arbres d'alignement dans le cadre de la gestion à la source des eaux de ruissellement.

R3.4 – Devenir des micropolluants piégés dans les substrats : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants organiques

L'objectif de cette action est d'évaluer le potentiel de dégradation des micropolluants organiques par les communautés microbiennes autochtones des sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales, et de fournir les briques pour la modélisation de ces processus.

R3.5 – Analyse des dynamiques temporelles au niveau d'un ouvrage de biorétention

L'action R3.5 se propose de poursuivre sur plusieurs années le suivi expérimental d'une noue filtrante implantée à Compans et précédemment étudiée au cours d'OPUR4. Il s'agit d'analyser l'évolution du fonctionnement de l'ouvrage du fait de son vieillissement et de mieux cerner la variabilité temporelle de l'efficacité de l'ouvrage, en couvrant les échelles intra-événementielles et inter événementielles.

ANIMATEURS

Marie-Christine GROMAIRE, marie-christine.gromaire@enpc.fr

Jérémy SAGE, jeremie.sage@cerema.fr



CONTEXTE

Le flux d'évapotranspiration (et son équivalent le flux de chaleur latente dans le bilan énergétique) est au cœur de différents enjeux modernes de la ville durable. Avec le réchauffement climatique, la France connaît des étés de plus en plus chauds qui se traduisent par des vagues de sécheresse et canicule plus fréquentes, ce qui a un impact sur la végétation urbaine et la qualité de vie des citoyens. La gestion à la source des eaux pluviales urbaines est de plus en plus prônée, grâce à des techniques souvent végétalisées et alternatives au « tout tuyau ». Depuis quelques années, la conception de ces techniques prend en compte la régulation du débit de pointe à l'exutoire (x l/s/ha) mais aussi l'abatement des pluies courantes (Zonage de la Ville de Paris, Agence de l'Eau Seine-Normandie par exemple). L'origine de ces abattements attendus peut être le flux d'infiltration mais dans des conditions défavorables de sol ou de risques, le flux d'évapotranspiration est parfois le seul moyen pour les assurer (c'est aussi le cas en toiture).

Le flux d'évapotranspiration en milieu urbain a commencé à être étudié assez tardivement dans les travaux scientifiques (il est possible de citer les travaux de Oke et Grimmond dans les années 1990) car il était peu au cœur d'enjeux opérationnels et il était aussi supposé réduit. Malgré des travaux de plus en plus nombreux et détaillés, il reste aujourd'hui assez méconnu et difficile à prédire.

OBJECTIFS

L'action Modélisation de l'évapotranspiration à différentes échelles spatiales d'Opur5 vise à avancer et améliorer la modélisation du flux d'évapotranspiration, dans un objectif de mieux représenter le bilan hydrologique de zones urbaines et de pouvoir mieux prendre en compte ce flux dans des actions opérationnelles (conception d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales, aménagement urbain, conception et entretien des espaces verts).

L'action mobilise les modèles développés dans les équipes de recherche d'Opur5 (Cerema Île-de-France et Ifsttar) et s'appuie sur des observations acquises, ou en cours d'acquisition, par ces mêmes partenaires. Il s'agira de tester rigoureusement et, dans la mesure du possible, améliorer les schémas d'évapotranspiration implantés dans des modèles, et cela à trois échelles spatiales : l'ouvrage, le quartier, et la ville. Les schémas présents actuellement dans les modèles utilisés sont tirés de la littérature scientifique et à l'origine développés pour des milieux agricoles ou forestiers, et ils n'ont jamais été rigoureusement évalués en milieu urbain, entre autre par manque d'observations.

METHODOLOGIE ET PLANNING

La première étape du travail consistera à faire un état des lieux des modèles existants d'évapotranspiration en milieu urbain, et de leur usage. Les principes et schémas de modélisation seront examinés, en particulier la prise en compte des bilans hydrologiques et/ou énergétiques, la représentation des compartiments sol et/ou atmosphère, Les échelles temporelles et spatiales d'application seront aussi qualifiées.

Il s'agira ensuite de tester les schémas d'évapotranspiration présents dans les modèles retenus, et cela à 3 échelles spatiales :

- L'échelle de l'ouvrage ou de la surface urbaine végétalisée : à cette échelle (l'hectare au maximum), la surface est supposée assez homogène et entièrement végétalisée. Elle peut être un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales, une pelouse, Les partenaires scientifiques de l'action développent des modèles pour représenter le bilan hydrologique d'ouvrages de gestion, et le travail sera effectué avec ces modèles : modèle Faveur pour les toitures végétalisées (faveur.cerema.fr), modèle Hydrus appliqué sur des noues d'infiltration, Les schémas d'évapotranspiration implantés dans ces modèles sont basés sur une valeur d'évapotranspiration potentielle, estimée exclusivement à partir des conditions météorologiques et de caractéristiques de la surface, modulée par l'état hydrique de la surface et du sol ;
- L'échelle du quartier (entre plusieurs hectares et quelques km²) : l'Ifsttar et le Cerema Île-de-France co-développent le modèle Urbs (Rodriguez et al.,) qui représente de façon distribuée et intégrée les différents flux d'eau circulant dans un quartier, avec une attention particulière sur le rôle du sol ;
- L'échelle de la ville (à partir de plusieurs km²) : le modèle Teb-Hydro co-développé avec Météo-France sera utilisé.

Les tests effectués permettront d'analyser (à la lecture de l'état des lieux effectué précédemment), d'évaluer (à partir d'observations) et d'inter-comparer les schémas d'évapotranspiration entre les 3 échelles.

La seconde étape du travail consistera à mener des réflexions et des tests visant à améliorer les schémas existants, à partir des enseignements tirés de l'étape de test. Ces améliorations pourront consister en des modifications des schémas d'évapotranspiration (par exemple, prise en compte de certaines caractéristiques de la végétation) ou plus simplement en de meilleures paramétrisations des schémas actuels (obtenues à partir des confrontations observations / simulations). Ce travail se fera sur tous les modèles testés, et il tirera parti des intérêts et limites identifiées dans la phase de test précédente.

Les choix des cas d'étude sont importants pour mener à bien le travail et ils seront mûris en début d'action. Ils se feront en considérant différents éléments :

- Les observations disponibles sur le bilan hydrologique, l'idéal étant de disposer de mesures du flux d'évapotranspiration mais ce n'est pas obligatoire. Des liens seront recherchés avec le projet EPEE mené par l'Ifsttar et le Cerema d'Île-de-France qui consiste à développer une mesure en continu du flux d'évapotranspiration adaptée aux petites surfaces urbaines. L'action prévoit quelques campagnes de mesure complémentaires, en particulier au sein de l'équipex Sense-City ;
- La facilité et les données disponibles pour appliquer les différents modèles. Certains des modèles ont déjà été appliqués et paramétrés sur des cas, et il s'agira de capitaliser le travail déjà effectué ;
- L'intérêt des partenaires pour certains cas ; il pourrait par exemple être intéressant d'appliquer les différents modèles sur le même cas.

Les cas d'étude suivants pourraient être intéressants : la toiture végétalisée expérimentale du Cerema (78), la ZAC du Moulon de Paris-Saclay (91), une noue à Compans (77), les lysimètres de la ville de Paris (75), le quartier du Pin-Sec (44), le village Olympique (93), les mini-villes de l'Equipex Sense-City (77).

Concernant le calendrier, il sera privilégié de monter l'action autour d'une thèse, dont le financement reste à trouver (des pistes existent avec le Cerema, l'Ifsttar, l'Ademe). Dans ce cas, l'action débiterait l'été 2019 pour 3 ans. A défaut, le travail se ferait autour d'un post-doc de 18 à 24 mois, à partir aussi de l'été 2019.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

D'un point de vue scientifique, il est attendu de meilleures connaissances et évaluation des schémas d'évapotranspiration de nos modèles, avec si possible même des améliorations.

D'un point de vue plus opérationnel, l'amélioration des modélisations de l'évapotranspiration doit permettre de mieux simuler les bilans hydrologiques, et donc par exemple de mieux concevoir et

dimensionner des ouvrages, de mieux évaluer l'impact de palettes végétales sur le cycle de l'eau ... Une attention particulière sera portée en fin d'action sur les enseignements à tirer pour les acteurs opérationnels.

PARTENAIRES

Le travail sera mené par le Cerema île-de-France et le laboratoire Eaux & Environnement de l'Ifsttar. Des partenariats scientifiques autres pourront être sollicités, en particulier autour des campagnes de mesure.

Des partenariats opérationnels pourront aussi être mis en œuvre, selon les cas d'étude retenus.

CONTACTS

Emmanuel Berthier, Cerema Île-de-France, Emmanuel.Berthier@cerema.fr

Fabrice Rodriguez, Ifsttar, fabrice.rodriguez@ifsttar.fr



ACTION R3.2 – PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DES JARDINS DE PLUIE : MESURES EN CONDITIONS CONTROLEES ET MODELISATION POUR UNE DIVERSITE DE CONTEXTES

CONTEXTE

Alors que les règlements d'assainissement et doctrines sur la gestion des eaux pluviales préconisent de plus en plus souvent l'abattement des x premiers mm de pluie, en privilégiant la gestion des eaux dans des ouvrages diffus pourvus de substrats végétalisés, des incertitudes subsistent sur l'efficacité hydrologique réelle de ces dispositifs, sur les facteurs conditionnant cette efficacité et sur sa variabilité temporelle. Les abattements hydrologiques obtenus sont conditionnés par le mode de conception : étanche ou non, drainé ou non, de la nature des substrats, la surface relative de l'ouvrage, mais aussi par les conditions climatiques et le régime pluviométrique. Afin d'orienter le choix des aménagements, des modèles simples mais fiables sont nécessaires. Si de tels outils commencent à apparaître sur le marché, leur fiabilité dans le cas des pluies courantes, dont le bilan hydrologique est fortement conditionné par l'état initial de l'ouvrage reste à vérifier.

OBJECTIFS

L'action R3.2 vise à établir de façon plus précise le bilan hydrologique d'ouvrages de type « biorétention » pour les pluies courantes. Elle s'attachera à analyser la variabilité de ce bilan en fonction du type de conception (étanche ou non, drainé ou non, présence d'une couche de stockage sous le drain), des dimensions relatives de l'ouvrage, de la nature des matériaux le constituant. La fiabilité des modèles conceptuels intégrés dans les logiciels d'hydrologie urbaine pour représenter ce bilan hydrique sera par ailleurs évaluée.

METHODOLOGIE

Cette action s'appuie d'une part sur le suivi expérimental fin d'un dispositif de biorétention (un jardin de pluie filtrant et infiltrant avec un drain surélevé) au sein de la « mini-ville climatique » Sense-city. Sense-city est un grand équipement constitué d'un vaste hall mobile reconfigurable de 400m² capable d'accueillir en conditions environnementales contrôlées des scénarii urbains réalistes incluant les principales composantes de la ville, telles que bâtiments, infrastructures, réseaux de distribution et sols. Implanté au cœur de la Cité Descartes à Paris Est, cet équipement se positionne comme un démonstrateur réaliste d'innovations urbaines et une plate-forme R&D, fournissant un terrain d'expérimentation riche et complexe. Sense-city est une infrastructure originale et unique dans le paysage français de la recherche urbaine, qui permet de tester des scénarios d'évolution climatique. Elle permet de mettre en œuvre des expérimentations à une échelle proche de l'échelle réelle, dans un contexte où la phase de conception est bien maîtrisée et la phase de construction peut être facilement contrôlée, de mettre en œuvre un réseau de capteur pour le suivi de leur fonctionnement, et de suivre le fonctionnement des ouvrages dans des conditions environnementales bien connues, qui peuvent être naturelles ou contrôlées artificiellement.

D'autre part, l'action s'appuiera également sur les données hydrologiques acquises dans le cadre de l'action 3.5 sur le site de Compans (noue filtrante étanchée et drainée). Des données sur le fonctionnement hydrologiques d'autres sites de conceptions différentes (jardinières non drainées, lysimètres) seront de plus recherchées, en collaboration avec les partenaires OPUR.

Ces données expérimentales seront exploitées afin d'évaluer les performances hydrologiques des ouvrages suivis. Elles serviront par ailleurs à la validation d'un modèle à base physique d'écoulement dans le sol (de type Hydrus 1D ou 2D ou équivalent). Ce modèle physique sera ensuite utilisé pour explorer un large panel de scénarios de conception et de mise en œuvre d'ouvrages, ainsi que pour évaluer par inter comparaison la validité des modèles conceptuels simplifiés intégrés dans les logiciels d'hydrologie urbaine.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Cette action vise la production de connaissances scientifiques et d'outils de modélisation permettant d'orienter le choix et la conception des ouvrages contribuant à l'abattement des pluies courantes.

CONTACTS

Marie-Christine Gromaire, Leesu, marie-christine.gromaire@enpc.fr
David Ramier, Cerema, david.ramier@cerema.fr



ACTION R3.3 : EVALUATION DE LA PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DES « ARBRES DE PLUIE »

CONTEXTE

Fossés, noues, revêtements poreux, toitures terrasses, ou bassins d'infiltration etc., différentes techniques permettent aujourd'hui de gérer la pluie au plus près de son point de chute, principalement dans des zones périphériques nouvellement construites. Les pays anglo-saxons étant en avance dans ce développement ont récemment incorporé l'arbre d'alignement filtrant. L'arbre d'alignement a l'avantage d'être un équipement déjà connu par les services techniques et pouvant être mise en place même dans les quartiers plus anciens en remplacement des unités existantes non filtrante.

L'arbre agit de plusieurs façons sur l'hydrologie, d'abord ses feuilles et ses branches interceptent la pluie, offrant ainsi un volume non négligeable de stockage. Un arbre adulte en ville intercepterait une centaine de litres par pluie (Gonzalez-Sosa et al., 2017). L'eau est ensuite partiellement guidée par les branches et le tronc vers les racines qui permettent une infiltration plus rapide dans le sol. En temps chaud l'arbre pompe l'eau du sol par évapotranspiration pouvant retirer jusqu'à plusieurs centaines des litres de l'eau du sol. Ainsi en optimisant ces fonctions hydrologique dans un système maîtrisé d'infiltration, l'arbre peut contribuer à une gestion plus efficace du ruissellement urbain (Berland et al., 2017). Dans la pratique (EPA, 2012) ceci se traduit le plus souvent par un arbre d'alignement, alimenté gravitairement par le ruissellement de la voirie, qui dépollue par filtration (dans une couche dédié ou non) est restituée l'eau traitée soit vers la nappe soit à l'égout. En fonction des capacités d'infiltration du sous-sol et la vulnérabilité des nappes, des solutions avec divers degrés de complexité ont été pensé et mise en œuvre.

OBJECTIFS

Cette action devra permettre de mieux circonscrire le concept d'arbre de pluie, en passant par études des cas et étude hydrologique à l'échelle pilote, pour *en fin* élaborer une démarche technique et scientifique autour d'un ouvrage grandeur nature.

METHODOLOGIE ET PLANNING

Cette action s'appuiera d'une part sur une étude des cas et d'autre part sur un volet expérimental, où les données hydrologiques de base seront acquises sur un pilote en conditions contrôlées au sein de la mini ville climatique Sense-City.

Dans le premier volet il s'agit de connaître des expériences décrites dans la littérature et des installations existantes en France ou dans des pays limitrophes, où les arbres (d'alignement) sont utilisés dans la maîtrise du ruissellement urbain. Dans ce volet il s'agit de recenser et synthétiser les approches existantes et mettre en exergue leurs points positifs, mais aussi les limitations dans la mise en place et l'opération. Ce volet pourra commencer dès le printemps 2019. Ce volet s'appuie sur des approches des sciences sociales et humaines.

Dans le deuxième volet il s'agit de faire murir les approches méthodologiques, et répondre aux questionnements tels que : De quels types d'expérimentations a-t-on besoin ? Que mesurer et comment ? Quels modèles utiliser et avec quel type de données les alimenter ? Ce deuxième volet

pourra commencer dès la mise en place de l'équipement Sense-City fin 2019 et consistera en premier lieu en un suivi hydrologique complet, conjugué la deuxième année à un suivi qualitatif.

Ces deux approches devront permettre de mettre en place un projet de thèse avec une collectivité comme la Ville de Paris ou une entreprise du pluvial, en élargissant l'expérimentation de Sense-City.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Le résultat attendu à l'issue du premier volet est un état d'art sur les arbres de pluie comme technique alternative pour la gestion des eaux pluviales, basé sur les données de la littérature et des cas existants. Les résultats à l'issue de la deuxième année seront la connaissance des ordres de grandeurs fonctionnel d'un pilote et un projet de mise en place à grandeur réelle. La recherche permettra de tester un nouvel équipement pour la gestion des eaux pluviales type "arbre de pluie" dans des conditions hydrologiques et environnementales satisfaisant les exigences de la ville.

PARTENAIRES

Sense-city, IFFSTAR, Cerema, Ville de Paris, autres

CONTACTS

Martin SEIDL, Leesu, martin.seidl@enpc.fr



**ACTION R3.4 : DEVENIR DES MICROPOLLUANTS PIEGES
DANS LES SUBSTRATS - INTERACTIONS DIVERSITE MICROBIENNE
ET BIODEGRADABILITE DES MICROPOLLUANTS ORGANIQUES**

CONTEXTE

La gestion à la source des eaux pluviales dans des ouvrages favorisant la filtration par le sol naturel ou un substrat adapté (ouvrages d'infiltration ou de biorétention) s'avère un moyen efficace pour lutter contre la pollution diffuse des milieux aquatiques (Ahiablame et al., 2012; Flanagan et al., 2018; Li and Davis, 2009). Elle permet en effet la rétention des micropolluants dans la couche superficielle du substrat. Dans le cas des métaux, cela conduit à une augmentation progressive des teneurs de la couche de surface du sol, essentiellement dans la zone d'arrivée d'eau (Tedoldi et al., 2017, 2016). Dans le cas des micropolluants organiques, des processus de biodégradation des polluants retenus dans cette couche de sol/substrats entrent en jeu, et pourraient limiter la vitesse d'accumulation.

Le comportement des micropolluants organiques dans ces ouvrages (accumulation, dégradation, relargages possibles) reste cependant encore peu documenté (DiBlasi et al., 2009; Le Fevre et al., 2015). De rares études ont été menées sur la biodégradation des hydrocarbures et des HAP dans le sol des ouvrages de filtration/infiltration (LeFevre et al., 2012a, 2012b; Leroy et al., 2015). Elles soulignent le lien existant entre la nature du couvert végétal, la diversité et les fonctionnalités des communautés microbiennes en place et le devenir des polluants organiques.

L'importance de ce phénomène de biodégradation pour différents micropolluants organiques, l'analyse des facteurs qui le conditionnent, et ses conséquences en termes de transfert du polluant ciblé ou de ses produits de dégradation restent insuffisamment documentés à ce jour. Une meilleure connaissance des communautés microbiennes se développant dans les ouvrages et une meilleure compréhension des processus microbiens en jeu sont pourtant indispensables pour améliorer la conception et la gestion de ces ouvrages.

OBJECTIFS

L'objectif de cette action est d'évaluer le potentiel de dégradation de micropolluants organiques issus des ruissellements urbains par les communautés microbiennes autochtones présentes dans les sols/substrats des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales.

Sur la base d'expérimentations en batch et en colonnes de laboratoires, complétées par de l'acquisition de données en site réel, cette action doit permettre la paramétrisation d'un modèle de transport réactif de micropolluants organiques afin d'évaluer le devenir sur le long terme (accumulation, dégradation, transfert) de ces polluants dans le sol des ouvrages.

METHODOLOGIE ET PLANNING

Cette action sera divisée en 3 parties principales :

- Phase 1 : Caractérisation de la diversité fonctionnelle et génétique des communautés microbiennes présentes dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales.

Ce travail s'appuiera sur l'échantillonnage de sols dans un panel diversifié d'ouvrages d'infiltrations, en service depuis plusieurs années. Il s'agit d'évaluer la biomasse présente dans ces sols, de caractériser les communautés microbiennes en terme de diversité génétique (approche méta-barcoding) et de diversité fonctionnelle (tests MicroRespTM), de relier cette composition à la

nature (propriétés physiques et agronomiques, teneurs en nutriments et en polluants) et aux conditions du sol (humidité, température). Afin de mieux déterminer les facteurs explicatifs des variations des communautés observées, les échantillons seront prélevés dans des ouvrages contrastés en distinguant dans chaque ouvrage 2 à 3 zones correspondant à des fréquences d'inondation et donc des niveaux de contamination différents. Les prélèvements pourront au besoin être répétés au cours de l'année afin de couvrir des conditions climatiques différentes. Pour le choix des sites et des points de prélèvements, on capitalisera sur les connaissances précédemment acquises pour une dizaine d'ouvrages d'infiltration dans le cadre de la thèse de Damien Tedoldi (2017).

- Phase 2 : Etablissement, au moyen d'essais en batch au laboratoire, des cinétiques de biodégradation ainsi que des isothermes d'adsorption/désorption d'une sélection de micropolluants organiques

Le potentiel de dégradation des micropolluants organiques par les communautés microbiennes présentes dans les sols sera tout d'abord évalué à partir d'essais en batch. Trois sols, correspondants à 3 communautés microbiennes différentes, seront retenus sur la base des résultats de la phase 1. Des extraits de sols contenant ces communautés microbiennes représentatives des sols seront mis en contact dans des batch avec de l'eau dopée en concentrations connues de micropolluants. Trois à quatre molécules modèles, choisies parmi les micropolluants organiques emblématiques du ruissellement urbain, et présentant des propriétés physico-chimiques différentes (temps 1/2 vie, Kow) seront sélectionnées. Le suivi de la dégradation des polluants dans le batch se fera par des analyses ciblées et non ciblées (action T1), afin d'identifier la formation éventuelle de métabolites (cinétiques d'un mois, 4 points de mesure dans le temps). Il sera associé à un suivi du métabolisme bactérien (par mesure de la production de CO₂) et des paramètres physico-chimiques du milieu (pH, Eh). Une étude spécifique de l'effet de la température sur la cinétique de dégradation sera réalisée pour un des sols étudiés.

Par ailleurs, les isothermes d'adsorption et de désorption des micropolluants organiques étudiés seront également établies pour les 3 sols sélectionnés, dans le cadre d'essais en batch spécifiques.

- Phase 3 : Validation des modèles combinés d'adsorption/désorption et de dégradation en conditions semi-réelles

Des essais en colonne seront menés sur des sols prélevés sur sites réels afin d'étudier, dans des conditions le plus proche possible des conditions *in-situ*, les effets combinés des processus de filtration, d'adsorption/désorption et de dégradation sur une sélection de micropolluants. 2 à 4 composés "modèles" seront choisis parmi les molécules organiques caractéristiques des eaux de ruissellement, et dont le protocole d'analyse est maîtrisé au Leesu, en privilégiant des composés présentant des propriétés physico-chimiques contrastées (temps de 1/2 vie et Kow notamment). Les colonnes de sol seront suivies sur une durée de plusieurs mois, durée pendant laquelle elles seront soumises à un apport en simulant des eaux de ruissellement. La mesure des flux sortant de la colonne et de l'évolution du stock serviront à valider un modèle de transport réactif, incluant le processus de biodégradation, et calé dans un premier temps sur la base des essais en batch.

Ces suivis en batch pourront au besoin être complétés par la mesure et la modélisation de l'évolution du stock sur un site réel (site de Compans pour lequel le stock a déjà été évalué en 2017 et fera l'objet d'une nouvelle évaluation au cours d'OPUR5)

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Les résultats obtenus devraient nous permettre de :

- Evaluer le potentiel et les performances de biodégradation des micropolluants organiques dans différents ouvrages de gestion des eaux de pluies
- Orienter les modes de conception/maintenance des ouvrages vers les solutions favorisant cette dégradation

- Fournir les premières briques d'un modèle de transport réactif intégrant la biodégradation, afin d'être en mesure de simuler l'évolution sur le long terme de la contamination des sols.

CONTACTS

Noureddine Bousserhine bousserhine@u-pec.fr

Julien Le Roux julien.le-roux@u-pec.fr

Marie-Christine Gromaire marie-christine.gromaire@enpc.fr



CONTEXTE

Les suivis expérimentaux sur ouvrage réel sont souvent limités en durée et partiels dans l'observation, ce qui ne permet pas de bien rendre compte de la dynamique de fonctionnement du système. Or, certains travaux passés ont permis d'identifier des périodes de dysfonctionnement au cours de l'année (Flanagan et al., 2018), ainsi qu'une évolution des performances dans le temps du fait de la maturation du système (Lucke et al., 2017; Merriman and Hunt, 2014).

OBJECTIFS

L'objectif de cette action est d'analyser la variabilité temporelle des performances d'un ouvrage de biorétention, en considérant trois échelles de temps : variabilité intra-événementielle, variabilité inter-événementielle et variabilité inter-annuelle.

METHODOLOGIE

L'action R3.5 se propose de poursuivre sur plusieurs années le suivi expérimental d'une noue filtrante implantée à Compans et précédemment étudiée au cours d'OPUR4. Il s'agit d'un site ayant fait l'objet d'une instrumentation lourde lors de sa construction en 2016 et de travaux de recherche conséquents sur les flux de micropolluants associés au ruissellement et leur devenir dans l'ouvrage.

Il s'agit ici d'analyser :

- L'évolution du fonctionnement de l'ouvrage du fait de son vieillissement. On peut en effet s'attendre à des évolutions du fonctionnement hydrologique du fait du colmatage du substrat filtrant (physique- du fait du cumul de particules interceptées dans les pores du substrat- ou chimique- du fait de la précipitation de CaCO_3) ou du fait du développement de la végétation qui pourrait augmenter le rôle de l'évapotranspiration et dont les racines peuvent favoriser la perméabilité du substrat et stabiliser celui-ci. On pourrait également s'attendre à des évolutions de l'efficacité épuratoire du fait de l'accumulation de polluants dans le substrat filtrant ou du fait de la formation d'une litière organique en surface qui pourrait favoriser la rétention de la fraction dissoute.
- La variabilité temporelle de l'efficacité de l'ouvrage, en couvrant les échelles intra-événementielles et inter événementielles. En effet, la performance du système a été étudiée pour un nombre limité d'événements pluvieux durant OPUR4. Des épisodes de fonctionnement dégradé vis-à-vis de la filtration des particules ont été observés durant l'hiver, sans que l'on puisse réellement juger de la fréquence de ce type de phénomène ni leur réelle saisonnalité ou de leur lien avec le salage de la route. Un suivi en continu du dispositif permettra de mieux appréhender ces phénomènes.

Ce suivi s'appuiera sur la mesure en continu des débits, des teneurs en eau et de la qualité des eaux brutes et drainées (conductivité et turbidité), couplée à des travaux ponctuels d'échantillonnage et d'analyse de l'eau et du sol.

Des travaux complémentaires seront également entrepris afin d'aller plus loin dans la compréhension des processus limitant l'abatement des métaux dissous. Il s'agit de mieux caractériser leur spéciation en entrée et en sortie du dispositif : fractionnement de la phase

particulaire et colloïdale par filtration et ultrafiltration et identification des principales phases porteuses, évaluation de la fraction libre par disque chélatant, caractérisation de la matière organique dissoute en Fluo3D.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBÉES

Basée sur des suivis en continu, et des retours d'expérience sur plusieurs années, cette action permettra d'évaluer avec plus de précision l'efficacité des ouvrages de biorétention pour la maîtrise des flux polluants et d'évaluer la pérennité de cette efficacité dans le temps. Elle permettra de mieux cerner les causes et les conséquences des périodes de dysfonctionnement et ainsi d'orienter la maintenance des ouvrages.

PARTENAIRES

Le travail sera mené par le Leesu, en partenariat avec le Cerema Ile-de-France et le laboratoire Eaux & Environnement de l'Ifsttar. Le site d'étude étant mis à disposition par le CD77, l'action sera développée en collaboration étroite avec la Direction des Routes de Seine et Marne.

CONTACTS

Marie-Christine Gromaire, Leesu, marie-christine.gromaire@enpc.fr
Philippe Branchu, Cerema, philippe.branchu@cerema.fr

REFERENCES THEME R3

- Ahiablame, L.M., Engel, B.A., Chaubey, I., 2012. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water. Air. Soil Pollut.* 223, 4253–4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Berland, A., Shiflett, S.A., Shuster, W.D., Garmestani, A.S., Goddard, H.C., Herrmann, D.L., Hopton, M.E., 2017. The role of trees in urban stormwater management. *Landsc. Urban Plan.* 162, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Bressy, A., 2010. Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines: effets de différents modes de gestion à l'amont. Université Paris-Est.
- Chan, F.K.S., Griffiths, J.A., Higgitt, D., Xu, S., Zhu, F., Tang, Y.-T., Xu, Y., Thorne, C.R., 2018. "Sponge City" in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy* 76, 772–778. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>
- Chocat, B., 2014. Le «tout-à-l'égout» est-il une bonne solution pour gérer les eaux pluviales urbaines ?
- DiBlasi, C.J., Li, H., Davis, A.P., Ghosh, U., 2009. Removal and Fate of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Pollutants in an Urban Stormwater Bioretention Facility. *Environ. Sci. Technol.* 43, 494–502. <https://doi.org/10.1021/es802090g>
- EPA, 2012. Stormwater to Street Trees Engineering Urban Forests for Stormwater Management (No. EPA 841 B 13 001 /epa_p100h2rq.pdf).
- Flanagan, K., 2018. Evaluation de la rétention et du devenir d'un panel diversifié de micropolluants dans un ouvrage de biofiltration des eaux de ruissellement de voirie. Université Paris Est.
- Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M., Gromaire, M.-C., 2018. Field performance of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff. *Water Res.* 145, 562–578. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.064>
- Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* 12, 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Becerril Piña, R., Mastachi Loza, C.A., Ramos Salinas, N.M., Chavez, C.V., 2017. A methodology to quantify ecohydrological services of street trees. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 17, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.06.004>
- IWA, 2016. Principes de l'IWA pour les Villes "Eau-Responsables."
- Le Fevre, G.H., Paus, K.H., Natarajan, P., Gulliver, J.S., Novak, P.J., Hozalski, R.M., 2015. Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells. *J. Environ. Eng. U. S.* 141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000876](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000876)
- LeFevre, G.H., Hozalski, R.M., Novak, P.J., 2012a. The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils. *Water Res.* 46, 6753–6762. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.040>
- LeFevre, G.H., Novak, P.J., Hozalski, R.M., 2012b. Fate of Naphthalene in Laboratory-Scale Bioretention Cells: Implications for Sustainable Stormwater Management. *Environ. Sci. Technol.* 46, 995–1002. <https://doi.org/10.1021/es202266z>
- Leroy, M.C., Legras, M., Marcotte, S., Moncond'huy, V., Machour, N., Le Derf, F., Portet-Kotalo, F., 2015. Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated road-side swales. *Sci. Total Environ.* 520, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.020>
- Li, H., Davis, A.P., 2009. Water Quality Improvement through Reductions of Pollutant Loads Using Bioretention. *J. Environ. Eng.-Asce* 135, 567–576. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000026)

- Lucke, T., Dierkes, C., Boogaard, F., 2017. Investigation into the long-term stormwater pollution removal efficiency of bioretention systems. *Water Sci. Technol.* wst2017382. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.382>
- Merriman, L.S., Hunt, W.F., 2014. Maintenance versus Maturation: Constructed Storm-Water Wetland's Fifth-Year Water Quality and Hydrologic Assessment. *J. Environ. Eng.* 140, 05014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000861)
- Tedoldi D., 2017. Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain. Université Paris Est.
- Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Branchu, P., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., 2017. Spatial distribution of heavy metals in the surface soil of source-control stormwater infiltration devices – Inter-site comparison. *Sci. Total Environ.* 579, 881–892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.226>
- Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., 2016. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review. *Sci. Total Environ.* 569, 904–926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.215>
- Thomas, I., Cunha, A.D., 2017. La ville résiliente: Comment la construire? Les Presses de l'Université de Montréal.



Thème R4 – Scénarisation de la gestion des eaux pluviales urbaines, dans un contexte de changements globaux

Une partie des transformations que l'on regroupe fréquemment sous le terme de *changements globaux*¹ induit de profondes mutations sur les systèmes urbains. Face à ces évolutions amorcées ou annoncées, certaines villes initient aujourd'hui une démarche de *transition*, qui vise à en atténuer les impacts négatifs, parmi lesquels on peut citer l'accroissement des inondations, la baisse du niveau des nappes phréatiques, la contamination de différents compartiments environnementaux, la formation d'îlots de chaleur urbains, ou encore la déperdition de la biodiversité en ville.

Le changement de paradigme qu'a connu l'hydrologie urbaine au cours des dernières décennies a vu l'émergence de nouvelles pratiques de gestion de l'eau en ville, dont la finalité a elle-même évolué au cours du temps : d'une vocation essentiellement hydraulique – pallier les insuffisances du réseau d'assainissement par une maîtrise des volumes et débits ruisselés – on parvient aujourd'hui à une vision beaucoup plus « intégrée » de ces systèmes. Les études expérimentales menées à l'échelle d'un ouvrage ont révélé des avantages « multicomposantes » de ces dispositifs : réduction des volumes renvoyés au réseau, recharge de la nappe phréatique, interception d'une partie des flux polluants, évapotranspiration et rafraîchissement de l'air ambiant, support à la biodiversité, fonction paysagère ; autant de constats qui suggèrent que les nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales pourraient participer pleinement à l'adaptation des systèmes urbains face aux changements globaux.

Néanmoins, l'effet « cumulé » de ces pratiques à l'échelle d'un quartier ou même d'un territoire urbain demeure assez mal appréhendé à l'heure actuelle. La question des transferts d'échelle a été peu abordée dans la littérature, de sorte que Golden et Hoghooghi, dans un article paru en 2018, qualifient ces considérations d'« *emerging science* ». Il est relativement complexe d'aborder le problème par des approches expérimentales, car cela nécessite de pouvoir comparer deux configurations « avec » et « sans » techniques de gestion à la source, *toutes choses égales par ailleurs*. Dans la pratique, les auteurs y parviennent avec plus ou moins de succès, soit en comparant plusieurs bassins versants aux caractéristiques similaires à l'exception des modes de gestion des eaux pluviales, soit en mettant en perspective des mesures hydrologiques avant et après une opération de renouvellement urbain. Pour une description détaillée de ces études, le lecteur est invité à consulter le document de synthèse bibliographique qui accompagne ce projet scientifique et sur la base duquel il a été construit. Mentionnons-en néanmoins les principales conclusions : même si certaines études n'ont pas réussi à mettre en évidence de différence statistiquement significative entre les indicateurs hydrologiques mesurés « en présence » et « en l'absence » d'ouvrage de contrôle à la source, d'autres ont démontré une réduction des débits de pointe à l'exutoire et de leur variabilité inter- et intra-événementielle, une réduction des volumes ruisselés, une augmentation du

¹ Cette expression, issue d'une traduction de l'anglais *global change*, désigne, au-delà du changement climatique, l'ensemble des changements induits par l'anthropisation sur les écosystèmes naturels et construits.

temps de concentration des bassins versants, ou encore une augmentation du débit de base des cours d'eau urbains.

À ce titre, il semble que la modélisation offre un terrain beaucoup plus favorable à de telles investigations, car elle permet de tester virtuellement différentes configurations à travers ce que l'on nomme communément une *analyse de scénarios* – contrairement aux approches expérimentales qui introduisent de nombreuses contraintes sur les terrains étudiés pour espérer parvenir à des conclusions significatives. Les scénarios en question peuvent concerner aussi bien le déploiement d'ouvrages de gestion à la source sur un territoire donné – démarche dont la littérature scientifique nous offre un certain nombre d'illustrations intéressantes – que la prise en compte d'autres changements globaux comme l'évolution urbaine. Concrètement, les approches de ce type qui ont été mises en œuvre jusqu'à présent ont permis de répondre à des questions telles que :

- l'effet de la nature et de l'emplacement des ouvrages au sein d'un bassin versant sur certaines caractéristiques du débit à l'exutoire (débit de pointe par temps de pluie, débit de base sur des chroniques longues, *etc.*),
- les emplacements « optimaux » pour la mise en place des ouvrages de contrôle à la source, vis-à-vis d'un objectif de maîtrise du débit de pointe et de prévention des inondations urbaines,
- le « seuil minimal » d'ouvrages à mettre en place sur un bassin versant pour observer une différence significative sur sa réponse hydrologique globale,
- ou encore l'intérêt de privilégier une gestion décentralisée des eaux pluviales, par rapport à une approche centralisée, pour éviter les rejets urbains de temps de pluie.

Le quatrième axe thématique du projet OPUR 5 a pour objectif d'aborder ces questions *dans un contexte de changements globaux*. Concrètement, il s'agit d'adopter une démarche de modélisation pour évaluer les « effets combinés » d'une diffusion des nouveaux modes de gestion des eaux pluviales en ville, et plus précisément leur capacité à *compenser* certains impacts négatifs (i) de l'évolution urbaine, (ii) du changement climatique, et (iii) des modifications des pratiques de construction, trafic, usages, *etc.* La finalité du travail est donc le développement et l'application d'outils destinés à :

1) Mettre en évidence les effets « à large échelle » :

- de solutions de gestion décentralisée ;
- de critères locaux (*e.g.* abattement des X premiers mm à chaque événement pluvieux).

2) Identifier des configurations « optimales » de mise en œuvre de la gestion à la source, c'est-à-dire :

- des scénarios de déploiement optimisés pour répondre à un objectif donné : combien d'ouvrages, à quel endroit, quelle conception (infiltration, rétention, présence d'un volume mort, *etc.*), quels bénéfices d'une combinaison d'ouvrages ?
- une réglementation adaptée (PLU, critère local donné aux aménageurs, *etc.*)

3) Creuser la question de la combinaison optimale entre le système centralisé existant (dont il n'est pas question de se passer) et les dispositifs décentralisés qui viendraient pallier les insuffisances du premier ; cette question peut encore se reformuler comme la recherche d'une combinaison optimale entre solutions « traditionnelles » et « innovantes ».

La figure 1 ci-dessous récapitule la démarche globale de cet axe de recherche, dont on détaille à présent les différentes étapes méthodologiques.

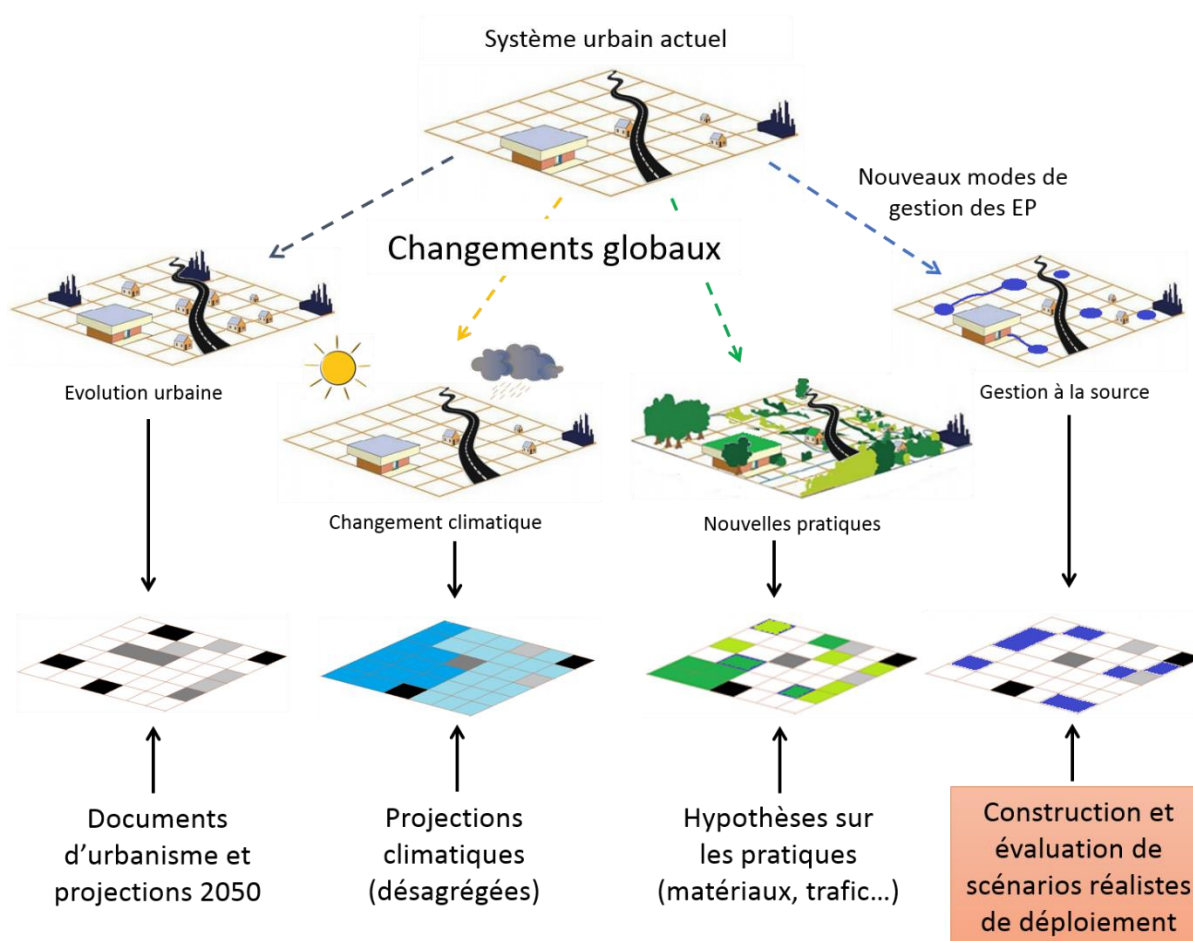


Figure 1 : Schéma de principe de l'approche de modélisation développée dans le cadre du thème 4 d'OPUR 5 : *Scénarisation de la gestion des eaux pluviales urbaines, dans un contexte de changements globaux.*

Plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés au cours des réflexions préliminaires autour de la définition du projet :

- La représentation des processus hydrologiques (notamment l'évapotranspiration et l'infiltration) dans les modèles pose encore certaines questions.
- Les modèles de production de polluants souffrent encore d'un manque de connaissance, que ce soit pour l'évaluation de l'émission unitaire associée à chaque type de surface urbaine, ou pour le recensement (automatisé) de ces surfaces contributives à l'échelle d'un territoire étendu.
- A partir du moment où l'on adopte une description spatiale « semi-distribuée », c'est-à-dire qui distingue des sous-entités homogènes sur le territoire d'étude, il ne semble pas envisageable de représenter l'ensemble des dispositifs mis en place sur le territoire considéré ; aussi est-il nécessaire d'établir des hypothèses de simplification pour *agréger* spatialement les données, c'est-à-dire passer d'un inventaire d'ouvrages à une « loi de comportement macroscopique », ou un « ouvrage-équivalent », par sous-bassin versant.

- La description correcte du réseau, ainsi que les couplages entre hydrologie de surface et réseau, présentent également plusieurs enjeux de recherche.
- Etant donné que l'on souhaite évaluer les effets du changement climatique, de l'évolution urbaine et des changements de pratiques, il est nécessaire (i) de *traduire* les projections climatiques et urbaines à l'horizon souhaité en données d'entrée pertinentes pour l'outil de modélisation utilisé, ce qui implique une démarche de désagrégation de ces données (Figure 1), et (ii) de *construire* des hypothèses sur les nouvelles pratiques.
- L'évaluation des scénarios se fait toujours à l'aune de critères/indicateurs de performance qu'il convient de définir au préalable. Ceux-ci pourraient inclure, sans s'y limiter :
 - la part de l'évapotranspiration et de l'infiltration dans le bilan hydrologique (ce que certains auteurs anglophones nomment la *capacitance* du bassin versant) ;
 - le flux annuel de différents contaminants envoyés vers les eaux superficielles, le sol ou la nappe phréatique ;
 - l'économie de ressource en eau pour certains usages ;
 - des indicateurs plus qualitatifs pour caractériser par exemple l'impact sur la biodiversité, le confort thermique ou l'adaptation au changement climatique.
- Enfin, une question cruciale réside dans l'établissement de scénarios *réalistes* de déploiement des ouvrages de gestion à la source. Ceci implique de comprendre et de caractériser le « potentiel d'implantation » de chaque type de dispositif dans un contexte donné, et révèle ainsi le caractère éminemment pluridisciplinaire du problème, dans la mesure où le choix et la mise en œuvre de ces techniques relève autant de considérations techniques (topographie, nature du sol en place, infiltrabilité, disponibilité foncière...) que des politiques locales de gestion des eaux pluviales, ou d'éventuels freins socio-techniques qu'il faut pouvoir prendre en compte.

Afin de faire sauter ces verrous et de permettre la mise en œuvre de la démarche de modélisation dans son ensemble, **un consortium de recherche** sera constitué entre trois équipes : le Laboratoire Eau et Environnement (IFSTTAR à Nantes), le Cerema Ile-de-France, et le Laboratoire Eau, Environnement, Systèmes Urbains. Ce partenariat se construira autour de deux outils de modélisation : **SWMM**, **URBS** et **TEB-HYDRO**. Précisons rapidement la nature de ces deux modèles.

Le modèle **URBS** (*Urban Runoff Branching Structure model*) est un modèle hydrologique distribué, dont la discrétisation spatiale repose sur un « réseau hydrographique », constitué du réseau d'assainissement et de la voirie, sur lequel sont connectées des unités hydrologiques définies d'après les parcelles cadastrales. Le modèle est donc basé sur :

- une fonction de production sur chaque unité hydrologique ;
- une fonction de transfert dans le réseau.

Chaque parcelle est divisée en trois composantes : les bâtiments (toitures), le jardin, et la voirie adjacente. Le modèle décrit également le sol sous chaque unité hydrologique, en incluant à la fois la zone non saturée et la zone saturée *via* un niveau de nappe variable.

Quant à lui, le modèle **TEB** (*Town Energy Balance*) appartient à une plate-forme de modélisation appelée **SURFEX** (*Surface Externalisée*), qui décrit les transferts d'énergie et d'eau entre le sol, la végétation et l'atmosphère ; son objectif initial était de fournir les conditions aux limites inférieures des modèles météorologiques de Météo France. La segmentation de l'espace se base sur un maillage régulier d'environ 250 m de côté ; *in fine*, le modèle évalue des transferts moyens par maille, mais il est possible de distinguer les types de surfaces à l'intérieur de la maille en faisant appel à des modules différents :

- Surfaces d'eau ouvertes ou fermées, gérées par le module **FLake** ;
- Surfaces naturelles (végétation, roche...), gérées par le module **ISBA** ;
- Surfaces urbaines, gérées par le module **TEB**.

Des développements récents ont permis de décrire la végétation à *l'intérieur des surfaces urbaines*, c'est-à-dire de coupler TEB et ISBA au sein d'une maille de type « surface urbaine » : le module qui réalise ce couplage s'appelle **TEB-VEG**. Comme URBS, il introduit ainsi une segmentation conceptuelle d'une surface urbaine en trois compartiments : bâti, voirie, et jardins. Initialement, le sol situé sous le bâti et la voirie n'était pas représenté dans le modèle, qui ne décrivait pas non plus le réseau, mais le développement de **TEB-HYDRO** a permis de remédier à ces lacunes dans la description du système. L'infiltration de l'eau a lieu dans les jardins et, dans une moindre mesure, sous les voiries, puis une redistribution latérale s'effectue dans le sol des trois compartiments. Pour ce qui est des transferts en réseau, seule une option de « routage » de l'hydrogramme à vitesse constante, avec sommation des différents signaux au niveau des jonctions, est disponible à ce jour. Une représentation simple des déversoirs d'orage via un « débit-seuil », au-delà duquel l'excédent est rejeté au milieu naturel, a déjà été évaluée dans un projet de recherche précédent.

Dans le cadre de ce consortium, plusieurs actions de recherche ont été définies pour mener à bien ce quatrième axe thématique d'OPUR 5 :

- **Action R4.1** : *Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier* (Isabelle Braud, Jérémie Sage, Emmanuel Berthier, Fabrice Rodriguez)
- **Action R4.2** : *Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain* (Marie-Christine Gromaire, Ghassan Chebbo)
- **Action R4.3** : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur* (Emilie Bernard, Katia Chancibault, Aude Lemonsu, Cécile de Munck)
- **Action R4.4** : *Modélisation de l'émission des polluants à l'échelle urbaine* (Marie-Christine Gromaire, Ghassan Chebbo)
- **Action R4.5** : Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie – Pollution – Climat urbain » (action collective) (Figure 2)

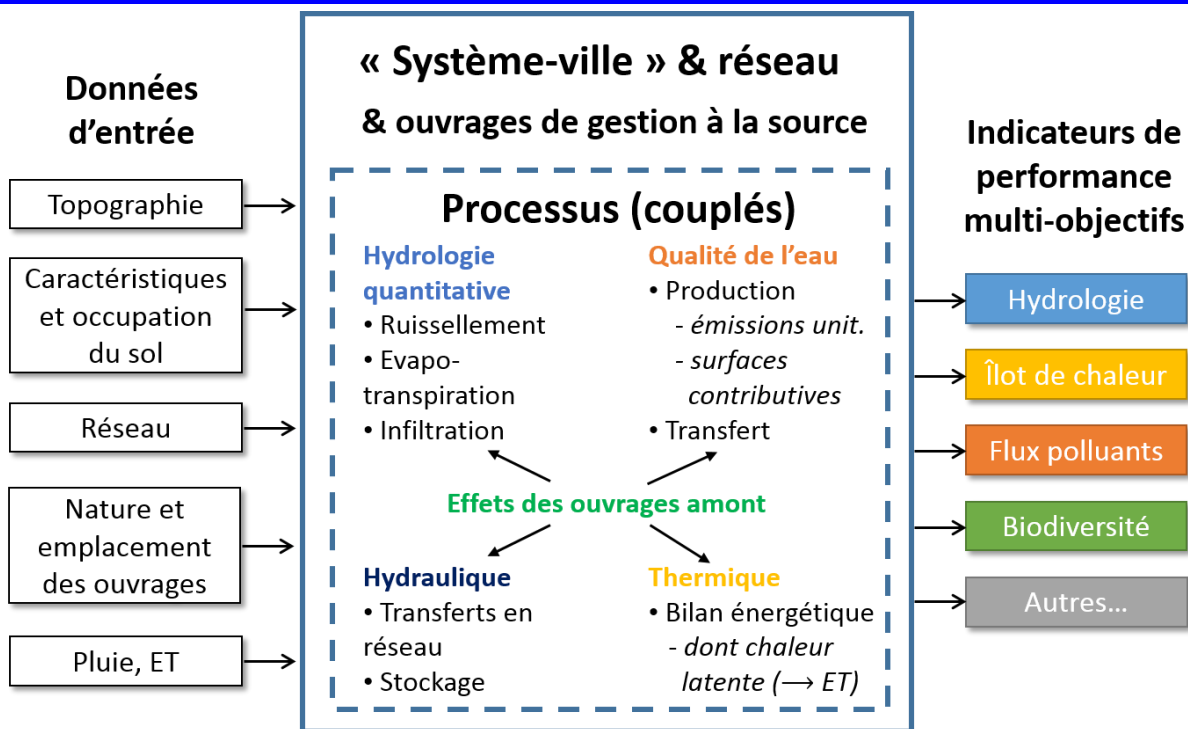


Figure 2 : Vision globale de l'approche de modélisation envisagée : système et processus à représenter dans le modèle, données d'entrée nécessaires, exemples d'indicateurs de performance en sortie.

Action R4.1. Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier

L'objectif de cette action est de préciser l'incidence des pratiques d'infiltration à la source des eaux pluviales urbaines sur le cycle de l'eau, et en particulier sur le niveau des nappes superficielles, en s'appuyant sur des outils de modélisation intégrés existants. L'utilisation du modèle URBS, co-développé par l'IFSTTAR et le Cerema Ile-de-France et spécifiquement destiné à l'étude des différentes composantes du cycle de l'eau en milieu urbain et périurbain, sera ici privilégiée.

Ce travail s'appuiera sur l'analyse et la comparaison d'une variété de scénarios de gestion du ruissellement, à l'échelle du quartier, simulés à partir du modèle URBS. Un temps important sera tout d'abord consacré à l'implémentation dans URBS d'un schéma de modélisation destiné à mieux représenter les écoulements de subsurface. La paramétrisation du sol dans URBS représente une évolution par rapport aux modèles classiques d'hydrologie urbaine ; elle conditionne le calcul de nombreux flux (infiltration, évapotranspiration, infiltrations parasites), mais ne rend pas bien compte de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrogéologiques du sous-sol et devra donc être consolidée. Le choix d'une représentation adéquate des écoulements souterrains s'avère bien souvent difficile, car supposant un compromis entre une description excessivement simple des processus et des schémas sur-paramétrés nécessitant une discrétisation spatiale relativement fine. Une adaptation de cette paramétrisation permettant de mieux rendre compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sol sera donc privilégiée. L'introduction de cette paramétrisation constituera un premier objectif scientifique de cette action de recherche.

Le modèle sera ensuite utilisé pour simuler, sur des bassins versants réels ou théoriques, différents scénarios d'infiltration des eaux pluviales correspondant à des variantes en termes de répartition spatiale ou de fonctionnement hydrologique des ouvrages. L'élaboration d'un plan d'expérience

permettant d'évaluer, d'une façon aussi générale que possible, l'impact des techniques de gestion à la source des eaux pluviales représente un problème méthodologique à part entière. Une attention particulière devra donc être portée à la définition des scénarios de gestion testés. Ces derniers pourront dans un premier temps être construits et évalués pour des bassins versant ayant d'ores et déjà fait l'objet d'une application du modèle URBS et pour lesquels des observations sont disponibles. La portée des résultats et la possibilité de les généraliser seront nécessairement limitées par le nombre et la nature des cas d'étude (type de tissu urbain, topographie, géologie...) retenus en première approche. La faisabilité et la pertinence d'approches plus théoriques reposant par exemple sur l'utilisation de bassins versants « synthétiques » pourra alors être discutée. Les résultats obtenus à l'issue de ce travail feront enfin l'objet d'une analyse de sensibilité qui permettra de rendre compte de l'incidence des différentes hypothèses ou incertitudes associées à l'utilisation et la paramétrisation du modèle URBS. Cette démarche, justifiée par les difficultés méthodologiques que soulève l'utilisation des modèles distribués, assurera alors la robustesse des conclusions obtenues et apportera un éclairage sur la pertinence d'outils tels que URBS dans un contexte plus opérationnel.

Action R4.2. Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain

Comme présenté ci-dessus, il s'agit ici d'évaluer, d'une part, la possibilité, et d'autre part, les effets d'une systématisation de la gestion à la source des eaux pluviales à l'échelle d'une zone urbaine, de façon à étendre les considérations et résultats acquis à l'échelle d'un ouvrage. La démarche prévue repose sur quatre piliers : (i) la réalisation d'une typologie des ouvrages de gestion à la source, (ii) la construction des scénarios de déploiement, (iii) l'identification des performances visées, et, en conséquence, la définition d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour évaluer ces scénarios, et enfin (iv) la mise en œuvre du modèle de simulation numérique qui sera construit dans le cadre de l'action n°5.

La typologie des ouvrages reposera aussi bien sur leur fonctionnement hydrologique (régulation du débit sans infiltration, combinaison régulation et infiltration, abatement des premiers millimètres de pluie, déconnexion totale...) que sur les autres effets qui auront été retenus comme pertinents (e.g. rétention des contaminants, soutien à la biodiversité, réduction de l'îlot de chaleur urbain, multifonctionnalité...). Cette étape permettra d'aboutir à des classes d'ouvrages génériques, décrites par un nombre limité de paramètres, et auxquelles seront associées des caractéristiques fonctionnelles.

L'élaboration des scénarios de déploiement sera fondée sur une analyse préalable des critères qui conditionnent le choix d'une solution technique parmi la palette d'ouvrages disponibles, à savoir :

- les « conditions physiques » du site étudié, et plus précisément :
 - les propriétés du terrain (topographie, capacités d'infiltration) ;
 - le climat local (caractéristiques de la pluviométrie, évapotranspiration) ;
 - le contexte urbain (emprise foncière, nature du bâti) ;
- les critères fournis aux aménageurs (débit maximum admissible dans les réseaux collectifs, interception d'une certaine lame d'eau à chaque événement pluvieux, tout-infiltration...) ;

- d'éventuels freins socio-techniques (capacités des services techniques à assurer l'entretien).

L'évaluation des scénarios requiert l'établissement d'indicateurs de performance. Ces derniers pourront inclure, sans s'y limiter, la part de l'évapotranspiration et de l'infiltration dans le bilan hydrologique (*i.e.* ce que certains auteurs appellent la « capacitance » du bassin versant), l'économie de ressource en eau pour certains usages, le flux annuel de différents contaminants envoyés vers les eaux superficielles, le sol ou la nappe, ou d'autres critères plus qualitatifs. La représentativité du modèle d'« ouvrage-équivalent » sera interrogée à l'aide de séries de mesures sur une zone urbaine caractérisée finement, ou bien grâce à un modèle de référence. Enfin, l'impact des scénarios préalablement établis sera éprouvé sur plusieurs cas d'étude, représentatifs d'une diversité de contextes urbains, climatiques, et socio-économiques.

La démarche de modélisation dans son ensemble permettra d'évaluer l'effet des changements multiples à l'échelle de zones urbaines, en abordant des questions telles que :

- l'effet de la nature et de l'emplacement des ouvrages au sein d'un bassin versant sur certaines caractéristiques du débit à l'exutoire (débit de pointe par temps de pluie, débit de base sur des chroniques longues, flux polluant, *etc.*),
- les emplacements « optimaux » pour la mise en place des ouvrages de contrôle à la source, vis-à-vis d'un objectif de maîtrise du débit de pointe et de prévention des inondations urbaines,
- le « seuil minimal » d'ouvrages à mettre en place sur un bassin versant pour observer une différence significative sur sa réponse hydrologique globale ou la température,
- ou encore l'intérêt de privilégier une gestion décentralisée des eaux pluviales, par rapport à une approche centralisée, pour éviter les rejets urbains de temps de pluie.

Action 4.3. Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur

Cette action de recherche vise à étudier, par la modélisation, la réponse couplée hydro-climatique d'une zone urbaine à des stratégies d'aménagement basées sur la végétalisation, en temps présent et futur

Le modèle TEB du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) sera utilisé. Il dispose depuis peu de paramétrisations physiques permettant de décrire la végétation urbaine de façon plus réaliste et parallèlement de représenter de façon détaillée les échanges hydrologiques au sein de l'écosystème urbain.

Le cas d'étude choisi concerne Paris et sa petite couronne. Ce choix est motivé, d'une part par la disponibilité, à la fois, de données urbaines (description des surfaces et du réseau hydrologique urbain) et d'observations météorologiques et hydrologiques ; et d'autre part, par l'importance des enjeux liés au changement climatique et à l'adaptation de ce territoire, qui toucheront une portion importante de la population.

Cette recherche comporte trois phases :

1. ÉTUDE DU BASSIN PARISIEN SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE (1979-Maintenant)

Cette partie consistera à réaliser une simulation “de référence” sur une période historique (de 1979 à maintenant) et à l’échelle d’évènements extrêmes remarquables (canicules, périodes humides). Il s'agira de : (1) Définir une configuration de simulation pour fournir des conditions météorologiques à des échelles spatiales et temporelles adaptées aux études d'impacts en milieu urbain ; (2) Identifier les indicateurs hydro-climatiques pertinents pour évaluer les impacts ; (3) Tester et évaluer les paramétrisations de végétation et d’hydrologie récemment développées dans le modèle urbain TEB.

2. RÉPONSE DU BASSIN PARISIEN AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans un deuxième temps, la réponse du bassin parisien au changement climatique sera évaluée dans le cadre de modélisation établi en début de thèse.

Ce travail s’appuiera sur deux thèses en cours au CNRM et à l’IFSTTAR :

- Les simulations réalisées au CNRM par Benjamin Le Roy (étude des méthodes de descente d’échelle dynamiques pour la production de projections climatiques à la résolution spatiale de 2,5 km avec le modèle AROME-Climat sur toute la France) pourront servir de point de départ pour la préparation de forçages climatiques futurs à haute résolution spatiale et temporelle pour Paris et sa petite couronne
- Les conclusions des travaux réalisés à l’IFSTTAR par Xenia Stavropoulos-Laffaille concernant l’évaluation d’une méthode statistique de désagrégation temporelle des projections climatiques régionales, à l’échelle de Nantes seront utilisées, si nécessaire, pour améliorer les champs pluvieux issus des projections climatiques.

3. ADAPTATION PAR LA VÉGÉTALISATION URBAINE

Dans un troisième temps, un choix de scénarios pertinents en termes d’aménagement sera établi, en lien avec les départements présents sur le territoire étudié, puis évalué dans le même cadre de modélisation.

R4.4. Modélisation de l’émission des polluants à l’échelle urbaine

La modélisation des émissions de polluants par une approche de type « SFA » (*Substance Flow Analysis*) repose sur deux piliers :

- la caractérisation de l’émission unitaire de chaque type de surface urbaine ;
- la détermination de l’« assiette émettrice » sur une zone donnée, c’est-à-dire le recensement des surfaces contributives au flux de la substance considérée.

La première étape du travail sera de réaliser une typologie des principaux polluants urbains selon leurs sources et leurs processus/dynamiques d’émission, puis d’identifier un « représentant » au sein de chaque famille. On peut imaginer par exemple :

- un composé classiquement associé au trafic routier (*e.g.* HAP)
- un composé émis par un processus de type « dissolution avec stock infini » (*e.g.* métal)
- un composé présent sur un type de surface avec un stock limité (*e.g.* biocide)

- un composé qui nécessite un processus de diffusion à l'intérieur du matériau avant de pouvoir être lessivé par la pluie (*e.g.* phtalate)
- et les matières en suspension

La suite du travail consistera à recenser les données expérimentales existantes, sur lesquelles il est possible de s'appuyer pour construire un tel modèle. Si de nombreuses données sont disponibles pour les métaux (*cf.* par exemple la thèse de Pauline Robert) et les biocides (thèse d'Antoine Van de Voorde), il faudra envisager de nouveaux essais pour caractériser les émissions unitaires des autres contaminants organiques et ainsi compléter la base de données expérimentales.

La caractérisation de l'« assiette » se décline en deux grandes questions : (i) comment inventorier ces surfaces de façon plus ou moins systématique ? et (ii) comment prendre en compte la variabilité des émissions pour un type de surface donné (sachant qu'on dispose le plus souvent de caractérisations expérimentales ponctuelles, en conditions contrôlées) ? Concernant le premier point, un certain nombre de travaux antérieurs se sont basés sur des procédures de recensement non-automatiques (*cf.* par exemple la thèse d'Emna Sellami). Compte tenu des développements technologiques récents, il semble que les bases de données urbaines, ou simplement les photos aériennes et autres vues 3D, présentent un potentiel très intéressant, pour peu que l'on soit capable d'en extraire des informations pertinentes qui permettraient de classifier un territoire de manière automatisée, et ainsi générer des cartographies des surfaces urbaines. Mentionnons par exemple les développements similaires dans le domaine du microclimat urbain (*Local Climate Zones*, *GENIUS*, *UrbanBEATS*, *World Urban Database*), dont il semble possible de s'inspirer. Néanmoins, cela requiert des compétences en traitement de l'image et méthodes d'assimilation de données *a priori* absentes du consortium de recherche, et implique donc une collaboration avec des équipes extérieures sur les aspects « traitement de l'image » (IGN par exemple).

L'amélioration des modèles de production de polluants permettra une description idoine au sein de la plate-forme de modélisation « hydrologie – pollution – climat urbain » dont la phase 5 d'OPUR initiera la création (action 5). Elle permettra par exemple de tester différents scénarios liés aux pratiques de construction ou d'entretien du bâti (utilisation généralisée d'un matériau non métallique pour les couvertures des immeubles, interdiction des biocides, *etc.*) ou les scénarios liés au trafic routier.

R4.5. Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie – Pollution – Climat urbain »

La mise en œuvre des objectifs du thème 4 d'OPUR requiert un outil de modélisation fonctionnel (Figure 2), qui permette une description « grande échelle » (de l'ordre de plusieurs dizaines de km²) des flux d'eau, de polluants et d'énergie en milieu urbain, afin de pouvoir tester *in fine* les différents scénarios qui auront été retenus comme pertinents dans les autres actions de recherche. L'objectif de cette action est de poser les bases d'un travail et d'une collaboration de long terme pour la construction d'un modèle intégré « hydrologie – pollution – climat urbain ».

Si l'on rencontre un très grand nombre d'outils de modélisation pour représenter l'hydrologie de surface, éventuellement les transferts en réseau, et les flux de contaminants associés², parmi

² Le lecteur qui souhaiterait de plus amples précisions à ce sujet est invité à consulter le rapport de synthèse bibliographique associé à la définition de ce projet.

lesquels on peut mentionner les modèles SWMM (*Storm Water Management Model*), SUSTAIN (*System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN*), MUSIC (*Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation*), ou SWAT (*Soil-Water Assessment Tool*), en revanche, on rencontre très peu de modèles couplant hydrologie et thermique, ce qui fait tout l'intérêt d'un modèle tel que TEB-HYDRO, que nous avons présenté ci-dessus. Néanmoins, ce dernier ne dispose pas encore de toutes les fonctionnalités requises pour tester les scénarios évoqués dans l'en-tête de ce document. A titre d'exemple, à l'heure actuelle, il ne décrit ni la pollution urbaine, ni les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales ; en outre, les transferts en réseau sont représentés par un routage simple à vitesse constante (paramètre d'entrée du modèle), comme mentionné ci-dessus. Ainsi, un certain nombre de développements apparaissent nécessaires pour répondre aux objectifs du thème 4. Les réflexions sur les flux polluants seront menées dans le cadre de l'action 4, celles sur les ouvrages de gestion à la source, dans l'action 2 ; par ailleurs, il semble intéressant d'envisager l'intérêt d'un couplage avec un modèle décrivant plus finement l'hydraulique, tel que SWMM. L'action 5 aura pour but de coordonner l'ensemble des développements, pour tendre vers un modèle intégré, regroupé dans un outil d'expertise commun, et d'instaurer une gouvernance du projet afin d'intégrer les contributions des trois laboratoires du consortium.

ANIMATEURS

Ghassan Chebbo, ghassan.chebbo@enpc.fr

Katia Chancibault, katia.chancibault@ifsttar.fr



OBJECTIFS A LONG TERME DE L'OBSERVATOIRE

L'observatoire de la gestion à la source a deux objectifs :

- analyser la durabilité et la pérennité des solutions de gestion à la source des eaux pluviales mises en œuvre sur un quartier ou plusieurs, en se focalisant en particulier sur les solutions les plus innovantes ou répondant à des enjeux multiples ;
- évaluer la performance globale d'une gestion à la source systématisée des eaux pluviales à l'échelle d'un bassin versant.

Il s'agira d'une part de suivre l'évolution sur le moyen et long terme d'un panel représentatif d'ouvrages de gestion à la source mis en œuvre sur le domaine public ou privé. Ces ouvrages feront l'objet d'un suivi de leurs performances physiques (capacité d'infiltration, fréquence et niveau de sollicitation hydrologique, évolution de la contamination du sol), de leur intérêt écologique et paysager (diversité végétale et éventuellement animale, présence d'espèces non souhaitées) et le cas échéant de leur performance énergétique. Ce suivi pourra s'appuyer sur un couplage entre des relevés terrain à fréquence biannuelle et des enquêtes (dont la fréquence reste à définir). Il s'appuiera sur des indicateurs de performance simplifiés, et sur de la mesure en continu avec des capteurs autonomes et à bas coût de certaines grandeurs caractéristiques (hauteur d'eau dans l'ouvrage, température, humidité, consommation énergétique...). Les pratiques de maintenance (nature, fréquence, coût, difficultés) devront également faire l'objet d'un recensement.

Par ailleurs, on évaluera sur la base d'enquêtes et d'entretiens la connaissance qu'ont de ces dispositifs (leur rôle, leur fonctionnement) les différents acteurs du quartier, qu'ils soient gestionnaires ou usagers. On s'intéressera en particulier à la façon dont cette connaissance évolue dans le temps, du fait du renouvellement des personnels et des habitants, ainsi que de l'évolution de l'ouvrage (modifications de perception du fait des développements végétaux ou des usages par exemple) pouvant induire une perte de la mémoire des fonctions techniques de l'ouvrage. Les usages seront évalués à partir d'observations sur site, tandis que la perception des dispositifs par différents acteurs et leur appropriation seront analysées sur la base d'entretiens et d'enquêtes menées à trois ans d'intervalle, selon une grille d'entretien commune.

L'observation visera d'autre part à qualifier les effets d'une généralisation de ce type de gestion décentralisée à l'échelle d'un quartier, et l'évolution de ces performances dans la durée. On s'intéressera en particulier aux impacts hydrauliques et hydrologiques.

OBJECTIFS OPUR5

La phase 5 d'OPUR permettra la maturation de l'idée d'observatoire de la gestion à la source ; le choix du ou des quartiers (ou opérations d'aménagement) pilotes ; la caractérisation des contextes institutionnels, organisationnels et techniques des opérations d'aménagement retenues pour constituer l'observatoire ; la collecte de données sur les dispositifs de gestion à la source mis en œuvre et de leur fonctionnement.

Elle comportera une première action d'observation, focalisée sur la phase de conception et de déploiement de la gestion à la source sur les quartiers retenus.

PHASE 1 : OBSERVATION ET ANALYSE DES CONDITIONS DE CONCEPTION ET DE DEPLOIEMENT DE LA GESTION A LA SOURCE

Il s'agit dans cette première phase d'analyser les pratiques actuelles de déploiement de la gestion à la source, depuis les phases de conception du système et de son intégration dans un dispositif urbain plus large, jusqu'aux étapes de dimensionnement et de mise en œuvre des ouvrages, et ce afin d'en évaluer la pertinence et les limites tant d'un point de vue technique que d'un point de vue organisationnel.

Si les solutions techniques et les méthodes de conception/dimensionnement sont connues et bien maîtrisées pour ce qui est de la régulation des débits de pointes, elles le sont moins pour ce qui est de la gestion des pluies courantes, tandis que la prise en compte d'enjeux multiples et innovants nécessite le développement de nouvelles procédures et outils. En l'absence de règles ou de guides de conception précis, la prise en compte de ces nouveaux enjeux et leur traduction opérationnelle peut s'avérer délicate, donner lieu à diverses interprétations et conduire à des dispositifs d'efficacité variable ou mal dimensionnés.

Par ailleurs, bien que la gestion à la source soit largement promue par les acteurs de l'eau et de l'assainissement et à présent largement inscrite dans les documents d'urbanismes, son déploiement effectif se heurte encore trop souvent à des résistances fortes au sein de certains services techniques, notamment les services en charge de la voirie ou des espaces verts.

Cette première phase d'observation sera de ce fait articulée autour de deux questions principales :

- L'évaluation des conditions d'alignement des acteurs,
- L'analyse de la pertinence des solutions techniques retenues.

Les travaux s'organiseront autour des questions suivantes :

- Quels objectifs de gestion de l'eau sur le quartier / la zone d'aménagement étudiés (objectifs hydrauliques ou hydrologiques, mais aussi objectifs thermiques, objectif de gestion des polluants, et de protection de la ressource) ? Par qui et comment ont-ils été définis ? Sont-ils compris et partagés par l'ensemble de la chaîne d'acteurs ?

Sur la base d'entretiens avec les différents acteurs, il est proposé d'observer l'articulation entre la ville, l'aménageur, les AMO, les promoteurs-constructeur et leurs prestataires VRP, afin d'en dégager les conditions nécessaires à la transmission des orientations d'aménagement à toutes les étapes du projet (conception, travaux aménagement, travaux construction, livraison, gestion...). On analysera par ailleurs les modes de fonctionnement entre les différents services techniques impliqués aux différentes étapes du projet et de la vie en œuvre des ouvrages, afin d'identifier les conditions nécessaires à une appropriation des solutions techniques retenues par l'ensemble de la chaîne d'acteurs.

- Comment ces objectifs sont-ils traduits dans les prescriptions techniques données aux aménageurs (quels critères) ? Comment ces prescriptions sont-elles appréhendées dans les méthodes de conception et de dimensionnement de l'ouvrage ? Ces méthodes de conception/dimensionnement permettent-elles effectivement d'assurer l'atteinte des objectifs initiaux ? Les outils et approches disponibles/utilisés sont-ils adaptés aux objectifs ?

Les concepts et les critères proposés seront évalués à l'aune des connaissances scientifiques actuelles. Une analyse scientifique d'un panel de solutions techniques proposées sera réalisée afin d'évaluer a priori dans quelle mesure ils permettent effectivement d'atteindre les objectifs visés. Ce travail s'appuiera notamment sur de la modélisation numérique des processus hydrologiques en jeu, en particulier pour ce qui est des enjeux liés à la gestion des pluies courantes. Sur la base des travaux de recherche antérieurs, en France et à l'étranger, des formulations alternatives des critères pourront être proposées et des méthodes alternatives de dimensionnement testées et comparées. Le panel de solutions « témoins » sera également évalué a posteriori, à partir d'une enquête terrain

visant à vérifier la conformité du dispositif par rapport aux plan initial, et à modéliser l'incidence des ajustements qui y auront été portés du fait de contraintes diverses.

Ces travaux se baseront sur l'observation des quartiers pilotes qui seront retenus pour constituer l'Observatoire de la Gestion à la Source au sein OPUR. Deux sites sont à ce jour envisagés : l'écoquartier La Vallée et son démonstrateur E3S à Chatenay Malabry, et un second quartier à Marne la Vallée.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEEES DE LA PHASE 1

Cette phase vise à mettre en évidence les freins dans la diffusion d'une gestion à la source à objectifs multiples (hydraulique, hydrologique, paysagère, thermique, productive...) des eaux pluviales et conditions nécessaire à un déploiement réussi. Elle cherchera à identifier les biais qui peuvent exister lors du processus de conception et de réalisation. Elle permettra également de tester des méthodes et outils de conception alternatifs, issus d'une valorisation opérationnelle de travaux de recherche récents (travaux issus de l'observatoire OPUR notamment).

CONTACTS

Marie-Christine Gromaire (marie-christine.gromaire@enpc.fr)

Bernard de Gouvello (bernard.de-gouvello@enpc.fr)

Jérémy Sage (jeremie.sage@cerema.fr)

Ghassan Chebbo (ghassan.chebbo@enpc.fr)



CONTEXTE

Depuis 1955 et le symposium de Princeton « *Man's Role in Changing the Face of the Earth* », puis avec le prix Nobel de Chimie Paul J. Crutzen en 1995, qui a permis sa popularisation, et plus récemment lors du 35^e Congrès géologique international de 2016, l'Anthropocène s'installe progressivement comme une nouvelle « époque géologique ». L'anthropocène est la reconnaissance de l'empreinte laissée par les activités anthropiques sur la planète. Le début de cette nouvelle ère fait encore débat mais il se situerait vers 1950. Le cas des micropolluants émergents ou non permet d'illustrer combien les activités anthropiques marquent durablement notre environnement et notre santé depuis une soixantaine d'années. Près de 400 millions de tonnes de produits organiques de synthèse sont fabriquées chaque année ; environ 1500 nouvelles substances sont lancées sur le marché. Chaque Français a consommé en moyenne 48 boîtes de médicaments en 2012 ; il utilise 4 tubes de dentifrice, 4 flacons de gel douche par an (<https://www.planetoscope.com>). Tous ces produits contiennent des substances chimiques (parabènes, méthylisothiazolinone, phtalates...) auxquelles les populations humaines et le milieu naturel sommes exposés. Janssen et al. (2004) ont montré l'existence d'un lien entre cette exposition au quotidien et plus de 200 maladies humaines. A travers quelques exemples célèbres (Distilbène®, Diclofenac, PCB, et plus récemment le métam-sodium), les impacts sanitaires et environnementaux des micropolluants ne sont plus à démontrer. Le cas particulier de la controverse des parabènes en France constitue un exemple récent de la réponse apportée par les industriels aux interrogations des consommateurs sur la présence de substances chimiques dans les produits de consommation courante : la substitution. Les limites de cette réponse ont été démontrées dans le programme Cosmet'eau. La nécessité d'acquérir plus d'information sur les sources de micropolluants en milieu urbain et sur leur évolution temporelle est renforcée par la mutation que connaît notre société : démarche « zéro phyto », diagnostic amont, « Villes & Territoires sans perturbateurs endocriniens »... Les retours d'expériences et/ou outils d'évaluation sur ces dispositifs ne sont pas toujours disponibles en raison de leur récente mise en œuvre.

De même, OPUR est un programme qui depuis 1994 a connu des évolutions considérables notamment sur la métrologie des contaminants. Ainsi, dans le cadre de la première phase, les contaminants suivis étaient les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et quelques métaux (Pb, Cu, Zn et Cd). A l'occasion de la troisième phase, le panel des contaminants s'est fortement élargi avec la mise en place d'une recherche élargie de 88 substances (appartenant à treize familles différentes) dans les phases dissoute et particulaire pour les eaux usées de temps sec en réseau unitaire comme en réseau séparatif, de même pour les eaux pluviales et, enfin, dans les ouvrages de traitement. Ce suivi a été réalisé en collaboration avec un laboratoire accrédité pour la partie analyse alors que toute la préparation amont des échantillons (prélèvements, filtration, conditionnement, acheminement) était réalisée par le Leesu. Parallèlement, des recherches ciblées sur des familles de contaminants ont été entreprises : alkylphénols, PBDE, parabènes, triclosan, triclocarban, benzalkonium, phtalates, microplastiques, biocides. Cependant, durant toutes ces années, il n'a pas été possible de mettre en œuvre un suivi pérenne de la qualité des eaux usées urbaines malgré tous les efforts consentis conjointement par les chercheurs impliqués dans le programme et les partenaires institutionnels. De fait, le suivi de la qualité des eaux usées urbaines en continu sur des sites de référence aurait permis de mieux cerner

différents aspects comme : l'évolution de la qualité des eaux urbaines, l'impact effectif de la réglementation sur leur qualité (à l'instar de ce qui a pu être observé pour les métaux dans les boues de STEP par les chercheurs du PIREN-Seine), les changements de pratique des usagers...

Lors de la quatrième phase du programme, une réflexion a été initiée avec les partenaires opérationnels d'OPUR sur la mise place d'un « observatoire des micropolluants » en milieu urbain. Si, en réponse à un questionnaire qui leur a été transmis, l'ensemble des partenaires a exprimé un vif intérêt pour un tel dispositif, les raisons de cet intérêt sont très différentes d'un partenaire à l'autre :

- Synthèse des réglementations en vigueur et des actions de réduction menées sur les autres territoires
- Évaluation de l'incidence de la réglementation sur la qualité des eaux rejetées par les industriels
- Réalisation d'un état zéro sur le territoire en vue d'une priorisation des actions à mener
- Accéder à la variabilité temporelle des concentrations et flux au regard de l'évolution des pratiques et des compositions des produits de consommation...

De même, les objets d'investigation ne sont pas toujours identiques : eaux résiduaires urbaines, eaux pluviales, dépôts de chambres à sable. Il apparaît cependant pertinent de s'appuyer sur les eaux usées pour mieux comprendre l'évolution de la ville.

OBJECTIFS

Les objectifs de la mise en œuvre d'un tel « observatoire », unique en France, qui aurait vocation à devenir pérenne,

- Réalisation d'un état zéro de référence sur l'agglomération parisienne ;
- Accéder à la variabilité temporelle des concentrations et flux au regard de l'évolution des pratiques et des compositions des produits de consommation...

Cet observatoire dépassera le cadre d'une phase du programme OPUR pour s'installer durablement dans le paysage francilien. Le caractère unique de cet observatoire viendrait du fait qu'il s'intéresserait à la qualité des eaux usées urbaine très en amont du cycle de l'eau alors que, généralement, ce type d'observatoire est plus orienté sur le milieu récepteur.

METHODOLOGIE ET PLANNING

METHODOLOGIE

1. Définition de la stratégie de l'Observatoire (1^{ère} année)

Durant cette première année, dans le cadre d'un groupe de travail intégrant les partenaires intéressés, les contours de l'observatoire des micropolluants seraient définis notamment pour ce qui concerne :

- La démarche : quel type d'observation souhaite-t-on développer : couplage des approches screening non ciblé – screening ciblé ? Injection directe ou extraction préalable ?
- Le site : quel site privilégier ?
- La fréquence de suivi : hebdomadaire ? mensuelle ? sur quelle phase ? Actuellement le screening non ciblé est opérationnel pour la phase dissoute.

Parallèlement, cette première étape devrait permettre de capitaliser sur les données déjà acquises autour des micropolluants dans les eaux usées résiduaires, les déversoirs d'orage et les chambres à sable afin de les bancariser. Il pourrait être envisager d'étendre cette démarche à d'autres

paramètres tels les paramètres généraux. Une réflexion doit également être initiée sur la mise en place d'une « échantillontheque », dans une première approche sur les solides : MES, solides de chambre à sable. Il s'agit de valoriser les efforts consentis chaque année par les gestionnaires des réseaux et de les mutualiser.

2. Screening des eaux résiduaires : premières investigations

La deuxième phase consisterait en la mise en place, à titre expérimental, d'un dispositif, qui préfigurerait l'observatoire futur, notamment sur l'approche par screening non ciblé, en travaillant sur le hall d'essai de Seine centre.

Cet essai s'étendrait sur une année avec la stratégie suivante :

- Un suivi mensuel systématique ;
- Un suivi à plus haute fréquence, à savoir un suivi quotidien, sur quinze jours ;
- Enfin sur la base des résultats obtenus lors de la comparaison des variabilités temporelles mensuelle vs journalière, envisager un suivi hebdomadaire sur un trimestre ou un semestre.

Cette deuxième phase permettra de conclure de façon objective sur la périodicité à définir notamment en raison de la lourdeur des manipulations, du traitement des données acquises et des variabilités observées. De même, nos résultats alimenteront la réflexion sur le transfert à plus ou moins court terme de l'observatoire vers un partenaire ou un consortium de partenaires et sur les modalités de sa pérennisation. Il est d'ores et déjà envisagé de maintenir un suivi des eaux usées à une fréquence mensuelle sur les trois dernières années de la phase.

3. Rétroobservation

Les eaux usées ne sont pas les seuls vecteurs d'information du métabolisme urbain, les dépôts s'accumulant dans les chambres à sable présentent également un potentiel à investiguer (Perez, 2004³). Les deux premières actions concernent la mise en place d'un observatoire des micropolluants, en d'autres termes l'établissement d'un monitoring des niveaux de contamination des eaux usées et de leur évolution. Le suivi de la qualité des dépôts des chambres à sable permet d'accéder à des phénomènes se produisant à des échelles de temps plus longues. Il fournit une information intégrative sur une période de temps plus longue, d'autant plus longue que la fréquence de maintenance est grande.

Chaque année les différentes collectivités curent régulièrement tout ou partie de leur réseau de chambres à sable permettant l'accès à des archives sédimentaires urbaines qui sont caractérisées en s'appuyant sur les moyens analytiques du moment et sur les informations nécessaires pour orienter leur gestion. L'essor de nouvelles méthodes de caractérisation pourrait permettre d'acquérir des informations inédites *a posteriori* et reconstruire l'histoire du bassin versant. Cela serait envisageable si ces échantillons étaient conservés. Développer une démarche d'archivage de type « carothèque » s'avère une priorité pour favoriser ces rétroobservations du métabolisme urbain. Lorsque le screening non ciblé sur phase particulière sera opérationnel, il sera conduit sur les échantillons de la « carothèque ».

PLANNING

	2019				2020				2021				2022				2023			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Action 1																				
Action 2																				
Action 3																				

³ Perez J. (2004) Gestion environnementale des boues de chambres à sable du réseau d'assainissement de la Ville de Paris :Cas des éléments métalliques, DEA Sciences et techniques de l'environnement, 86 p.

RESULTATS ATTENDUS ET RETOMBEEES

Construire un observatoire pérenne des eaux usées résiduelles et des dépôts de chambre à sable : il serait alors possible aux collectivités de devenir acteur du développement des politiques publiques en fournissant des informations précédant les réglementations et contribuant à leur élaboration.

CONTACTS

Régis Moilleron : moilleron@u-pec.fr

Jérémy Jacob : jeremy.jacob@lsce.ipsl.fr