



Que sait-on des micropolluants dans les eaux urbaines ?

Cyrielle Briand, Adèle Bressy, Chebbo Ghassan, José-Frédéric Deroubaix, Steven Deshayes, Jean-Claude Deutsch, Johnny Gasperi, Marie-Christine Gromaire, Julien Le Roux, R. Moilleron, et al.

► To cite this version:

Cyrielle Briand, Adèle Bressy, Chebbo Ghassan, José-Frédéric Deroubaix, Steven Deshayes, et al.. Que sait-on des micropolluants dans les eaux urbaines ?. ARCEAU IdF; AFB - Agence française pour la biodiversité, 2018, 978-2-490463-00-8. hal-01803319

HAL Id: hal-01803319

<https://enpc.hal.science/hal-01803319>

Submitted on 30 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Que sait-on des **micropolluants** dans les eaux urbaines ?

AVEC LE SOUTIEN DE L'AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ (AFB)

et la participation de :

Agence de l'eau Seine-Normandie (**AESN**) ; Association Recherche-Collectivités dans le domaine de l'eau en Ile-de-France (**ARCEAU-IdF**) ; Centre scientifique et technique du bâtiment (**CSTB**) ; Cluster Eau, Milieux et Sols (**Cluster EMS**) ; Conseil départemental des Hauts-de-Seine (**CD92**) ; Conseil départemental de la Seine-Saint-Denis (**CD93**) ; Conseil départemental du Val-de-Marne (**CD94**) ; Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (**DRIEE**) ; Groupe de recherche, d'animation technique et d'information sur l'eau (**GRAIE**) ; Institut des sciences analytiques - Centre national de la recherche scientifique (**ISA-CNRS**) ; Laboratoire d'Ecologie des hydrosystèmes Naturels et Anthropisés - Centre national de la recherche scientifique - Université Claude Bernard, Lyon 1 (**LEHNA, CNRS-UCBL**) ; Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions - Institut national des sciences appliquées de Lyon (**DEEP-INSA-Lyon**) ; Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains - Université Paris-Est Créteil/Ecole des Ponts ParisTech (**LEESU-UPEC**) ; Laboratoire Eau Environnement - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux de Nantes (**LEE-IFSTTAR-Nantes**) ; Syndicat interdépartemental de l'assainissement et de l'agglomération parisienne (**SIAAP**) ; **Ville de Paris** ; **Laboratoire Watchfrog**.





Que sait-on des **micropolluants** dans les eaux urbaines ?

AUTEUR : BRIAND Cyrielle (ARCEAU-IDF)

COORDONNATEURS : CHEBBO Ghassan (LEESU, Ecole des Ponts ParisTech), PAUPARDIN Julien (CD93)

CO-AUTEURS :

Scientifiques :

OPUR :

BRESSY Adèle, CHEBBO Ghassan, DEROUBAIX José-Frédéric, DESHAYES Steven, DEUTSCH Jean-Claude, GASPERI Johnny, GROMAIRE Marie-Christine, LE ROUX Julien, MOILLERON Régis, TASSIN Bruno, VARRAULT Gilles (LEESU, UPEC/Ecole des Ponts ParisTech)

OTHU :

BARRAUD Sylvie, BERTRAND-KRAJEWSKI Jean-Luc (DEEP, INSA-Lyon)

ONEVU :

RUBAN Véronique (LEE, IFSTTAR-Nantes)

Opérationnels :

BOUSSAC Claire (CD92), DIANOUX Charlotte (DRIEE), LEMKINE Gregory (Watchfrog), LEVAL Claire (AFB), NEVEU Pascale (Ville de Paris), PAUPARDIN Julien (CD93), QUILLIEN Ronan (CD93), RABIER Alain (CD94), ROCHER Vincent (SIAAP), ZEGLIL Zinou (AESN)

CONTRIBUTEURS :

AFRIT Bilel (DRIEE), ALLONIER Anne-Sophie (AESN), BACOT Laetitia (GRAIE), BAILLY Anaïs (DRIEE), BELHOMME Godefroy (CD93), BERDOULAY Marie (AESN), BRELOT Elodie (GRAIE), DECESNE Laurent (Cluster EMS), DE GOUVELLO Bernard (CSTB), GIMENEZ Miléna (Cluster EMS), KARLESKIND Eve (CD94), LACOUR Céline (AFB), LERY Simon (DRIEE), LIPEME-KOUIYI Gislain (DEEP, INSA-Lyon), MARCOVITCH Daniel (ARCEAU-IDF), MERMILLOD-BLONDIN Florian (LEHNA, CNRS-UCBL), SEVERIN Irina (ARCEAU-IDF), SOYER Mathilde (ARCEAU-IDF), TABUCHI Jean-Pierre (SIAAP), TEDOLDI Damien (LEESU), VANDELANNOOTE Frederick (CD93), WIEST Laure (ISA, CNRS)



AVANT- PROPOS

Nous sommes confrontés à l'omniprésence des micropolluants dans notre environnement quotidien, issus des activités industrielles, agricoles, urbaines et domestiques. Aujourd'hui, plus de 100 000 substances chimiques sont référencées en Europe¹. Pourtant, dès 1962, la scientifique américaine Rachel Carson avait alerté sur les effets négatifs des pesticides sur l'environnement², soulevant des questionnements sur les impacts sanitaires des micropolluants. Depuis, une prise de conscience globale et croissante de la part des institutions publiques et privées, de l'ensemble de la communauté scientifique et du grand public a émergé sur cette problématique. En conséquence, le nombre d'études sur les sources et les impacts des micropolluants n'a cessé d'augmenter. Ces études se sont d'abord intéressées aux métaux et hydrocarbures aromatiques, puis aux substances dites prioritaires au titre de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE 2000) et, plus récemment, à certains perturbateurs endocriniens liés notamment aux usages domestiques. Cependant, de nombreux aspects restent encore méconnus car les micropolluants représentent un sujet complexe par la diversité des substances et des acteurs concernés.

L'association ARCEAU-IdF (Association Recherche-Collectivités dans le domaine de l'eau en Ile-de-France) a fait des micropolluants l'une de ses thématiques principales. Elle a créé en 2014 un groupe de travail sur le sujet, composé de chercheurs issus des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales ainsi que des gestionnaires du monde de l'eau. Très rapidement, la volonté d'assurer le transfert des connaissances acquises sur les micropolluants s'est imposée au sein du groupe. Ainsi, pendant près de deux ans, les membres du groupe ont travaillé à l'élaboration d'un ouvrage sur les micropolluants. Cet ouvrage propose une vision globale des micropolluants organiques et métalliques dans les eaux urbaines, en s'appuyant sur les principaux travaux scientifiques français et plus particulièrement sur les résultats des trois observatoires métropolitains en hydrologie urbaine (OPUR à Paris, OTHU à Lyon et ONEVU à Nantes). Il s'articule autour de quatorze questions en phase avec les préoccupations et besoins des acteurs opérationnels de l'eau et de l'assainissement.

Les quatorze questions traitées, bien qu'indépendantes, ont été regroupées en cinq chapitres thématiques. Le premier présente les éléments de contexte de la problématique des micropolluants. Le deuxième identifie les sources urbaines de micropolluants ; il offre une vision d'ensemble des niveaux de contamination des eaux urbaines et de leur contribution aux flux de micropolluants. Le troisième chapitre vise à éclairer le lecteur sur les processus qui déterminent le devenir des micropolluants dans les environnements urbains et naturels. Le quatrième chapitre traite de l'efficacité et des limites d'une gestion curative des eaux usées et pluviales. Enfin, le cinquième chapitre présente les éléments déterminants pour améliorer le suivi des micropolluants.

1. Substances chimiques portant un numéro EINECS permettant d'identifier une substance chimique répertoriée dans l'inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes (EINECS - https://fr.wikipedia.org/wiki/Num%C3%A9ro_EINECS).

2. Rachel Carson (1962). *Printemps silencieux*. Marseille (France): Editions Wildproject, traduction française J.-F. Gravrand et B. Lanapeze de 2014, 279 p. ISBN 9782918490272.



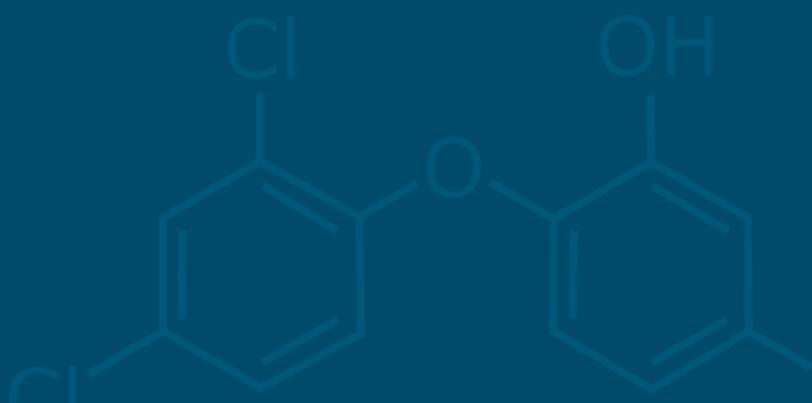
Le mot des **opérationnels**



Cet ouvrage apporte aux gestionnaires de l'eau et de l'assainissement, et plus largement aux autres services des collectivités (voirie, bâtiment...), une vision globale sur les enjeux liés aux micropolluants dans les eaux urbaines. En dressant un état des lieux de leur présence, des sources émettrices, de leurs caractéristiques intrinsèques et de leur comportement dans le système d'assainissement, il ouvre des champs d'investigation possibles pour les maîtriser.

Les risques potentiels encourus par les écosystèmes et l'Homme justifient, au-delà du cadre réglementaire européen ou national, les efforts entrepris par les services opérationnels. La lutte contre les micropolluants recouvre également un certain nombre d'actions et d'initiatives locales : la prescription de dispositifs de gestion à la source auprès des aménageurs, les autorisations de déversements des industriels, la conformité des branchements, l'adaptation des ouvrages hydrauliques à la réduction des flux de pollution, l'entretien des réseaux, le diagnostic amont des agglomérations d'assainissement et la sensibilisation des producteurs et des particuliers...

Cet ouvrage de synthèse offre l'opportunité d'une réflexion sur l'évolution de nos pratiques et orientations stratégiques.



Présentation du réseau **Urbis**

Urbis est un réseau national d'observatoires en hydrologie urbaine. Il a pour objectif de fédérer et coordonner les actions menées par trois observatoires français : **OPUR en région parisienne, OTHU sur la métropole de Lyon, ONEVU pour Nantes métropole**. Entre 2010 et 2016 il a été labellisé « système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement » (SOERE Urbis) par AllEnvi (Alliance nationale de recherche pour l'Environnement).

OPUR (Observatoire des Polluants URbains), créé en 1994 à Paris

OPUR est un programme de recherche pérenne en hydrologie urbaine qui vise à améliorer les connaissances sur les processus hydrologiques, biogéochimiques et sociaux conditionnant les eaux urbaines. Les recherches permettent d'obtenir une vision globale du fonctionnement du système de gestion de ces eaux. Elles prennent en compte des changements multiples (urbanisme et architecture, réglementation, climat, usages, etc.) et analysent la résilience des infrastructures de gestion à ces évolutions. Des efforts particuliers portent sur l'évaluation et la promotion de solutions innovantes permettant d'atténuer les effets de ces changements et de contribuer à l'émergence de systèmes urbains à faible empreinte environnementale.

OPUR est porté par le LEESU et repose sur un partenariat durable entre acteurs scientifiques et institutionnels. A l'heure actuelle, parmi les partenaires scientifiques figurent : le CEREAS (Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique), Eau de Paris, le LCPP (Laboratoire central de la préfecture de police), la DIE - SIAAP (Direction innovation et environnement du SIAAP), le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) d'Île de France, AQUASIM - CSTB, LEE - IFSTTAR, ICUBE - ENGEES (Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie - École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg). Les partenaires institutionnels regroupent l'AESN, le SIAAP, la ville de Paris, les CD92, CD93 et CD94. Des efforts importants ont été déployés pour co-définir les enjeux de recherche et mettre en place des plateformes de communication. L'appropriation des résultats et des outils conduit à une amélioration des pratiques de conception, de dimensionnement et de gestion et au déploiement de nouveaux concepts d'intégration des eaux dans l'espace urbain.

Pour plus d'informations :

<https://www.leesu.fr/opur>



OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine), créé en 1999 à Lyon

L'OTHU est né en 1999 de la volonté commune de l'INSA Lyon et de la Communauté Urbaine de Lyon de mieux structurer et définir conjointement des actions de recherche collaboratives dans le domaine de l'eau. L'OTHU est un laboratoire « hors murs » d'observation et de recherche sur les rejets urbains et leurs impacts sur les milieux, notamment par temps de pluie, pour proposer de nouvelles solutions de conception et de gestion de l'assainissement. Le parti pris de l'OTHU depuis sa création est de développer sur l'agglomération lyonnaise i) un système d'observation *in situ* partagé, ii) des systèmes météorologiques pérennes et intensifs pour une meilleure connaissance des dynamiques (variabilité temporelle) des phénomènes sur le long terme et de leur variabilité spatiale, iii) obtenir des données fiables et qualifiées en termes d'incertitudes, et iv) une vision pluri/interdisciplinaire mêlant connaissance opérationnelle experte et savoir scientifique.

C'est une Fédération de Recherche (FED 4161) qui rassemble neuf établissements de recherche : INSA-Lyon, Université Lyon 1, Université Lyon 2, Université Lyon 3, Irstea de Lyon (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture), Ecole centrale de Lyon, ENTPE (Ecole nationale des travaux publics de l'état), VetAgro Sup (Institut d'enseignement supérieur et de recherche en alimentation, santé animale, sciences agronomiques et de l'environnement) et le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), douze laboratoires, 110 chercheurs et de nombreux partenaires opérationnels. L'INSA Lyon est la structure porteuse de la FED.

Pour plus d'informations :
<http://www.othu.org>

ONEVU (Observatoire Nantais des EnVironnements Urbains), créé en 2006 à Nantes

Installé à Nantes depuis 2006, l'ONEVU a développé une activité de recherche d'observation sur les flux d'eau, d'énergie et de polluants aux interfaces sol/surface/atmosphère dans les milieux urbanisés. Dans un premier temps, une approche d'observation physique et chimique a été mise en œuvre sur le territoire d'un bassin versant urbain résidentiel situé à l'intérieur du périphérique nantais, constituant un hydrosystème pertinent pour l'étude de ces flux. Dans la continuité de cette approche, d'autres bassins versants ont ensuite été équipés pour le suivi des flux d'eau et/ou de la qualité des eaux et des sols : le bassin versant de la Prairie de Mauves intégrant une ancienne décharge située en bord de Loire et le bassin versant périurbain de la Chézine. Ces territoires d'observation permettent d'aborder les thèmes suivants au sein de l'ONEVU : l'hydrologie et la climatologie urbaine, la géochimie des eaux et des sols urbains et la télédétection urbaine.

L'ONEVU associe quatre partenaires scientifiques : le laboratoire Eau et Environnement (Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre - GERS/ IFSTTAR), le LHEEA (Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique - Ecole Centrale de Nantes), le LPG (Laboratoire de Planétologie et Géodynamique - Université de Nantes), le service géologique régional Pays de la Loire (BRGM) et deux partenaires institutionnels : Nantes Métropole et Air Pays de la Loire. Le laboratoire porteur de cette candidature est le laboratoire Eau et Environnement de l'IFSTTAR.

Pour plus d'informations :
<http://www.ee.ifsttar.fr/linstitut/gers2/laboratoires/ee-ifsttar/equipements/onevu/>



1

POURQUOI S'INTÉRESSER AUX MICROPOLLUANTS ?

- 14 | Les micropolluants, de quoi parle-t-on ?
- 17 | Quels sont les enjeux environnementaux liés aux micropolluants ?
- 23 | Quelle réglementation pour les micropolluants de la ville au milieu récepteur ?

2

D'OÙ VIENNENT LES MICROPOLLUANTS ET EN QUELLE QUANTITÉ ?

- 30 | D'où viennent les micropolluants en zone urbaine ?
- 35 | Que sait-on de la signature et des niveaux de concentrations en micropolluants des eaux urbaines ?
- 41 | Quelle est la contribution des différentes sources et voies de transfert aux flux des micropolluants ?

Table des matières

9

4

COMMENT LIMITER LE TRANSFERT DE MICROPOLLUANTS VERS LE MILIEU ?

- 58 | Les stations de traitement des eaux usées (STEU) permettent-elles d'abattre les concentrations en micropolluants ?
- 62 | Comment gérer les micropolluants dans les eaux pluviales ?
- 68 | Quelle est la qualité des sous-produits de l'assainissement et les conséquences sur leur devenir ?
- 73 | Quelles alternatives à la gestion curative des micropolluants ?

3

QU'EST CE QUI DÉTERMINE LE DEVENIR DES MICROPOLLUANTS DANS L'ENVIRONNEMENT URBAIN ?

- 50 | Quels sont les processus physico-chimiques et biologiques impliqués dans le devenir des micropolluants ?

5

QUELLES PRÉCAUTIONS POUR LE SUIVI DES MICROPOLLUANTS ?

- 78 | Comment choisir les molécules à suivre ?
- 82 | Quelle stratégie opérationnelle pour le suivi des micropolluants ?
- 86 | Quelles sont les approches complémentaires (les outils biologiques, physiques) ?

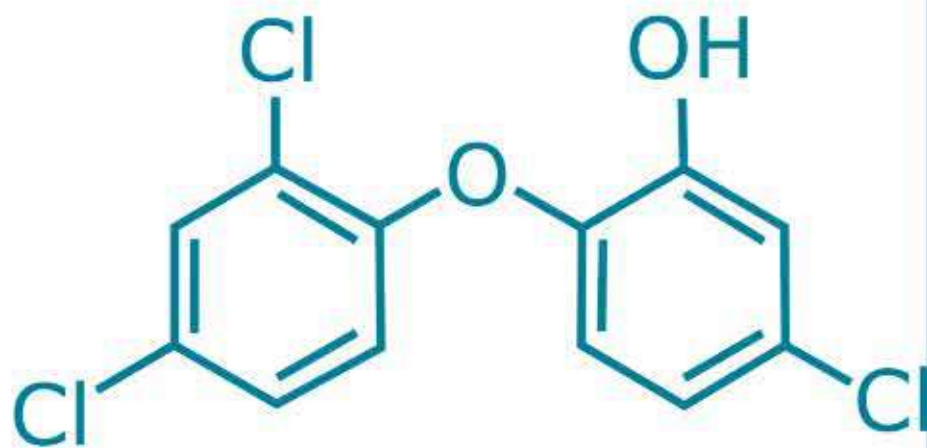
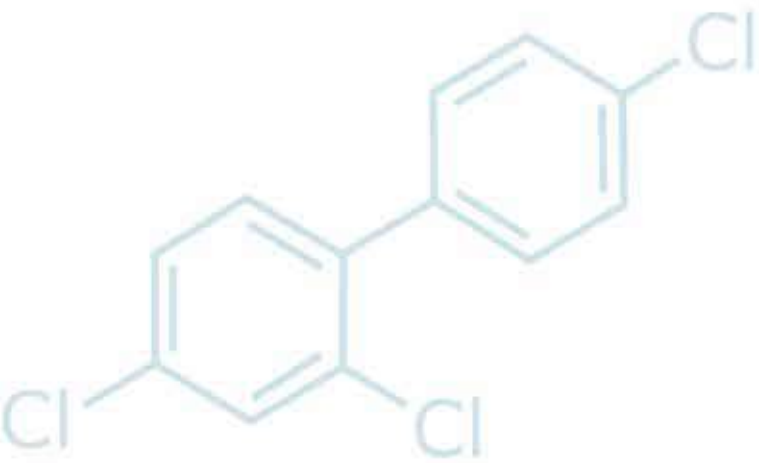
Sigles et abréviations

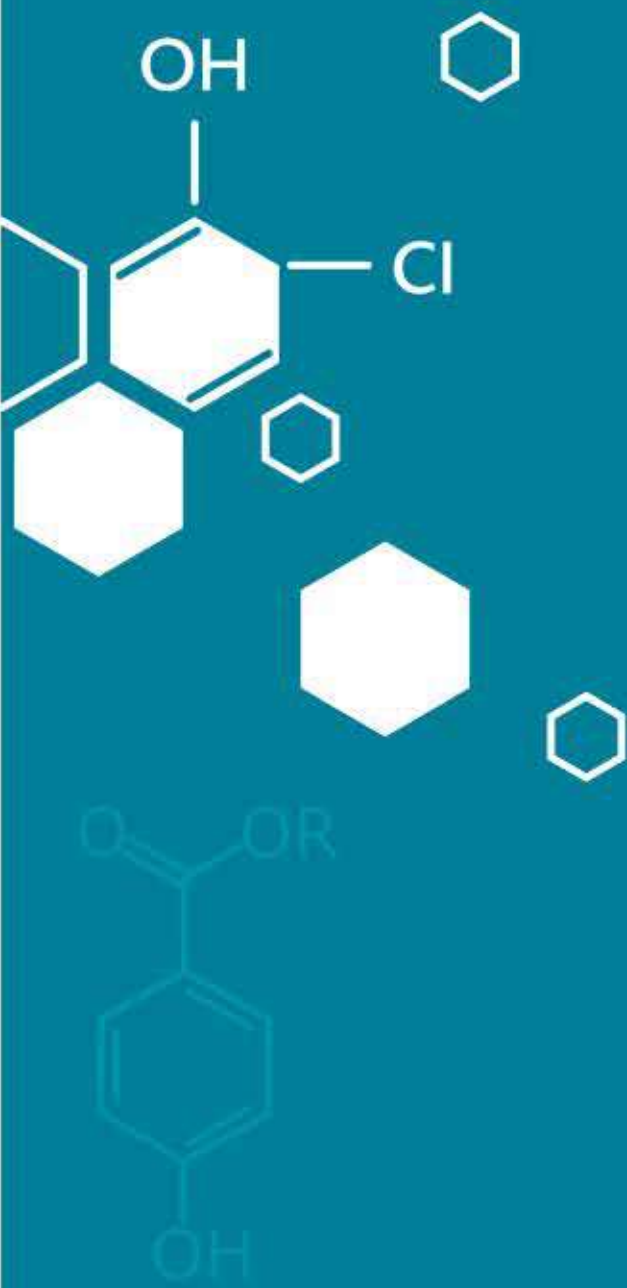
- AESN : Agence de l'eau Seine-Normandie
- AFB : Agence française pour la biodiversité
- AMPA : Acide aminométhylphosphonique
- ANR : Agence nationale de la recherche
- COV : Composés organiques volatils
- DBO5 : Demande biochimique en oxygène
- DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane
- DCE : Directive cadre sur l'eau
- DEHP : Di(2-éthylhexyl) phtalate
- EH : Equivalent-habitant
- HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- KH : Constante de Henry
- ICPE : Installations classées pour la protection de l'environnement
- INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques
- IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- Log Kow : Coefficient de partage octanol/eau
- MES : Matières en suspension
- MOD : Matière organique dissoute
- ng/L : Nanogrammes par litre
- NQE : Norme de qualité environnementale
- ONEVU : Observatoire nantais des environnements urbains



- OPUR : Observatoire des polluants urbains
- OTHU : Observatoire de terrain en hydrologie urbaine
- PBDE : Ethers de biphényles polybromés, ou polybromodiphényléther
- PCB : Polychlorobiphényles
- POP : Polluants organiques persistants
- PVC : Polychlorure de vinyle
- PSEE : Polluants spécifiques de l'état écologique
- RAT : Retombées atmosphériques totales
- REACH : Registration, evaluation, authorization and restriction of chemicals
- RSDE : Action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau
- SDAGE : Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux
- SDP : Substances dangereuses prioritaires
- SIAAP : Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne
- SPAS : Substances pertinentes à surveiller
- SP : Substances prioritaires
- STEU : Station de traitement des eaux usées
- $T_{1/2}$ vie : Temps de demi-vie
- vPvB : Substance-s très persistantes et très bioaccumulables
- $\mu\text{g/L}$: Microgrammes par litre

Pourquoi s'intéresser aux micropolluants ?





-
- 14** | Les micropolluants, de quoi parle-t-on ?
- 17** | Quels sont les enjeux environnementaux liés aux micropolluants ?
- 23** | Quelle réglementation pour les micropolluants de la ville au milieu récepteur ?
-



Les micropolluants, de quoi parle-t-on ?

Essentiel

Le terme micropolluant désigne un ensemble de substances qui proviennent au moins en partie des activités humaines et qui présentent des effets nocifs avérés ou suspectés mêmes aux faibles concentrations (du ng/L au µg/L) auxquelles elles sont présentes dans l'environnement. Il n'existe pas de liste arrêtée comprenant l'ensemble des micropolluants car celle-ci évolue au fur et à mesure des connaissances sur les effets des substances étudiées. Certains micropolluants, dits historiques, sont connus depuis longtemps, c'est le cas des métaux ou des HAP. Parmi les 100 000 substances chimiques référencées en Europe³, certaines reconnues comme « micropolluants » sont réglementées et d'autres non. Certains micropolluants, appelés émergents, sont nouvellement étudiés à la suite d'un progrès analytique, d'une prise de conscience ou d'une médiatisation. Les micropolluants peuvent être regroupés par familles chimiques, usages, effets ou statut réglementaire. Un micropolluant peut ainsi appartenir à plusieurs groupes. **Les effluents industriels, les rejets urbains, l'agriculture et les produits agricoles sont des sources de micropolluants identifiées et étudiées depuis les années 1970. Plus récemment, les micropolluants liés aux émissions domestiques (médicaments, cosmétiques, lessives, détergents, pesticides, solvants, tensioactifs, plastifiants, retardateurs de flammes...) sont au cœur des problématiques liées aux micropolluants.**

Définition d'un micropolluant

On trouve plusieurs définitions des micropolluants, sans qu'aucune n'ait de portée réglementaire. Toutefois, elles s'accordent toutes sur le fait qu'il s'agit de substances nocives, présentes à de faibles concentrations (du ng/L au µg/L) et résultant d'une introduction dans l'environnement essentiellement d'origine anthropique.

« Substance indésirable détectable dans l'environnement à très faible concentration (µg/L voire ng/L). Sa présence est, au moins en partie, due à l'activité humaine (procédés industriels, pratiques agricoles ou activités quotidiennes) et peut à ces très faibles concentrations engendrer des effets négatifs sur les organismes vivants en raison de sa toxicité, de sa persistance et/ou de sa bioaccumulation ». Définition du ministère de l'Environnement (devenu ministère de la Transition écologique et solidaire).

Sur les 100 000 substances chimiques référencées en Europe³, il est difficile d'estimer le nombre de substances pouvant être classées comme micropolluants puisqu'on ne connaît que celles que l'on étudie. Toutefois, environ 900 substances (métalliques et organiques) considérées comme étant des micropolluants sont suivies, régulièrement ou épisodiquement, dans les eaux françaises par les différents organismes de suivi.

Familles/groupes de micropolluants

Le terme « micropolluant » ne définit pas une classe de molécules en particulier, mais englobe une grande diversité de substances aux propriétés et aux usages extrêmement variables. De ce fait, différents regroupements sont classiquement utilisés (Figure 1) :

- par leur structure chimique : composés aromatiques (comme les HAP), organophosphorés, les polychlorobiphényles (PCB), alkylphénols, phtalates...

3. Substances ayant un numéro EINEC qui permet d'identifier une substance chimique répertoriée dans l'inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes.

- par leur devenir dans le milieu comme les COV (composés organiques volatils), POP (polluants organiques persistants), les vPvB (substances très persistantes et très bioaccumulables),
- par leurs propriétés physico-chimiques : éléments traces métalliques vs micropolluants organiques, molécules hydrophiles vs hydrophobes,
- par leurs usages/familles : les composés impliqués dans la formulation des pesticides, cosmétiques, pharmaceutiques...,
- par les types d'effets sur la santé humaine et les écosystèmes : perturbateurs endocriniens, cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques...,
- par leur statut réglementaire (voir pages 23 et 78) : « substances prioritaires » et « substances dangereuses prioritaires », « polluants spécifiques de l'état écologiques », « substances pertinentes à surveiller »...

Un micropolluant peut ainsi appartenir à plusieurs groupes ce qui complexifie la classification. Par exemple le tributylétain (famille chimique des organoétains) est utilisé comme biocide et possède des effets de perturbation endocrinienne.

Brève histoire des micropolluants

Jusqu'au milieu des années 1990, l'étude des micropolluants concernait uniquement les polluants organiques persistants (DDT, PCB) et les métaux. A côté de ces **micropolluants dits historiques**, les évolutions réglementaires dont la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) ainsi que les importants progrès analytiques de ces dernières décennies ont conduit au suivi de substances prioritaires dont la liste réglementaire est mise à jour régulièrement. Par ailleurs, les **micropolluants « émergents »** regroupent des polluants non réglementés, sur lesquels les connaissances sont très parcellaires en ce qui concerne les niveaux d'imprégnation des milieux ainsi que leur toxicité. **Leur usage n'est pas forcément nouveau, mais l'intérêt qu'on leur porte l'est.** Parmi ces polluants émergents, certains font, ou ont fait l'objet d'une médiatisation particulière ces dernières années : les phtalates, les alkylphénols, le bisphénol A, ou encore les résidus pharmaceutiques. D'autres en revanche, comme les biocides-désinfectants, les plastifiants ou les détergents restent insuffisamment étudiés malgré des impacts sanitaires et environnementaux suspectés. A tous ceux-là, s'ajoutent les substances qui à ce jour ne sont pas encore identifiées ou détectées.

Une prise de conscience progressive... et des responsabilités partagées

Dès les années 1970 et 1980, les **micropolluants liés aux activités industrielles et aux rejets urbains** (Figure 2) ont été mis en lumière suite à différents épisodes de contamination des milieux. Puis, dans les années 1990, ce sont les produits utilisés dans **l'agriculture et en lien avec l'alimentation** (pesticides) qui ont à leur tour été pointés du doigt (Figure 2). De gros efforts réglementaires et administratifs ont depuis été consentis pour une meilleure gestion des rejets industriels et urbains. Plus récemment, les micropolluants liés aux **émissions diffuses des particuliers et aux pratiques domestiques** (médicaments, cosmétiques, lessives, détergents, pesticides, solvants, tensioactifs, plastifiants, retardateurs de flammes...) sont au cœur des problématiques des micropolluants (Figure 2). **La question des micropolluants est donc passée d'une vision de sources globales ponctuelles et collectives à des usages individuels et diffus.**

Les micropolluants urbains ont des origines multiples (voir page 30) et ils sont introduits dans les milieux aquatiques par les **rejets urbains (eaux usées et pluviales)**. C'est dans ce cadre que l'Agence française pour la biodiversité et les Agences de l'eau ont financé treize projets en 2014 ayant pour objectif de « lutter contre les micropolluants dans les eaux urbaines ». Ces actions viennent compléter les mesures du plan Micropolluants

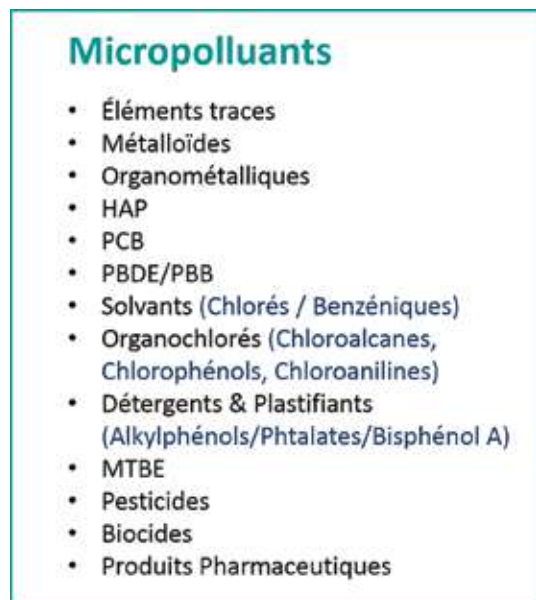


Figure 1 : Exemple de regroupement de micropolluants proposé par l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN-Aquascop, 2008, PBDE : polybromodiphényléthers, PBB : polybromobiphényle, MTBE : méthyl-tert-butyl éther).

(2016-2021), élaboré par le ministère en charge de l'écologie en collaboration avec les ministères en charge de la santé et de l'agriculture. Il vise à préserver la biodiversité et à répondre aux objectifs de bon état des eaux fixés par la directive cadre sur l'eau (DCE) et participe à ceux de la directive cadre stratégie

milieu marin (DCSMM) en limitant l'apport de polluants via les cours d'eau au milieu marin. Il cible en particulier les collectivités et la réduction à la source des micropolluants pour lesquels les risques sont connus ou fortement suspectés et vise à améliorer les connaissances sur les micropolluants.

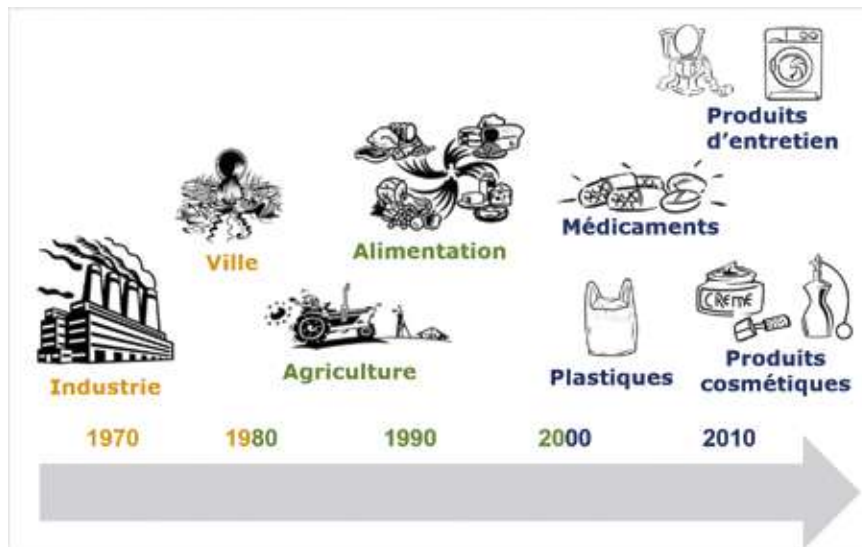


Figure 2 : Evolution de la prise de conscience des sources de micropolluants (modifié d'après Moilleron, 2016).



Quels sont les enjeux environnementaux liés aux micropolluants ?

Essentiel

Par définition, les micropolluants sont des substances toxiques susceptibles de provoquer des perturbations et l'altération des fonctions d'un organisme vivant entraînant des effets nocifs, voire la mort. Dans les faits, de nombreux cas de pollutions aiguës et accidentelles ont attiré l'attention sur l'impact sanitaire et environnemental des micropolluants. Cependant, les micropolluants sont connus pour avoir des effets même à faibles concentrations. L'impact d'une exposition chronique aux micropolluants est fortement suspecté mais les connaissances sont encore parcellaires. En effet, l'impact d'une substance sur un organisme dépend de la toxicité du micropolluant mais aussi de l'exposition de l'organisme à cette substance. L'évaluation de cette exposition est complexe de par la multiplicité des micropolluants (et produits de dégradation) présents dans un milieu donné et des voies d'exposition des organismes (inhalation, application cutanée, ingestion). L'approche réglementaire s'appuie sur des tests en laboratoire réalisés sur des espèces animales ou végétales dont les résultats sont extrapolés (facteurs de précaution) pour aboutir à des normes sanitaires. Pour l'environnement, les normes de qualité environnementales définies par la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) sont les seuls outils existants. Dans les zones urbaines, les rejets de stations d'épuration des eaux usées (STEU), les surverses unitaires de temps de pluie et les eaux pluviales des réseaux séparatifs sont reconnus comme étant responsables de l'apport diffus de micropolluants vers le milieu naturel.

La question de la présence de micropolluants dans l'environnement et plus particulièrement dans les ressources en eau est une préoccupation majeure. Une prise de conscience du risque lié à l'utilisation des substances chimiques s'est développée suite à de nombreuses études scientifiques portant sur leur identification, leur comportement, leur transfert et leur devenir dans l'environnement.

Toxicité des micropolluants

Les micropolluants sont des substances chimiques toxiques entraînant des effets nocifs, voire la mort des organismes vivants, même à de faibles concentrations.

DIFFÉRENTS TYPES DE TOXICITÉ

Il existe plusieurs types de toxicité (*Tableau 1*) :

- génotoxicité,
- mutagénicité,
- cancérogénicité,

- organotoxicité,
- perturbation endocrinienne,
- troubles des comportements,
- troubles du développement, de la reproduction, du quotient intellectuel.

Ces dérèglements peuvent toucher l'ensemble des organes des systèmes cardiovasculaire, respiratoire, nerveux central, digestif, reproducteur, lymphatique et sanguin mais aussi le lait maternel et le fœtus. La complexité de leurs modes d'actions rend impossible toute généralisation de la toxicité de ces substances même au sein d'une famille de micropolluants (AESN-Aquascop, 2008).

TOXICITÉ CHRONIQUE/AIGUË

La toxicité peut aussi être définie en fonction du délai entre l'exposition et l'apparition de l'effet toxique, on parle alors de :

- **toxicité chronique**, dont les effets apparaissent après une exposition prolongée à la substance (imperceptibles sur une courte échelle de temps),

- **toxicité aiguë**, dont les effets sont rapides (quelques heures à quelques jours suivant l'espèce) et parfois mortels. Le seuil de toxicité aiguë est toujours plus élevé que le seuil de toxicité chronique.

Dans un premier temps les pollutions ponctuelles (rejets industriels...) et accidentelles (mercure dans la baie de Minamata (Japon), dioxines de la catastrophe de Seveso (Italie), PCB à Anniston (USA)...) ont attiré l'attention sur la question de la toxicité et de l'impact des micropolluants sur l'environnement et la santé. Toutefois, **l'ensemble des études menées** (depuis les années 70) sur les rejets urbains (de temps sec ou de temps de pluie) **ont montré l'importance et l'impact d'une pollution diffuse sur les milieux aquatiques**. Ces études se sont principalement focalisées sur les HAP et les métaux. Plus récemment de nombreuses études s'intéressent à d'autres micropolluants organiques.

Impacts environnementaux et sanitaires

Même si l'humain s'intègre dans un écosystème global, on distingue souvent les impacts sur l'environnement et les impacts sanitaires.

On parle de toxicologie lorsque l'on s'intéresse aux effets d'une substance sur la santé humaine. L'écotoxicologie, beaucoup plus récente, étudie l'impact d'une substance sur un écosystème.

IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

La contamination des eaux par les micropolluants, même en très faibles concentrations, conduit à des effets biologiques et toxiques sur les animaux exposés (organismes primaires, poissons, mammifères marins, oiseaux). Une perturbation affectant les premiers niveaux trophiques est susceptible de se répercuter sur le reste de la chaîne alimentaire modifiant l'ensemble de l'écosystème (processus de bioamplification).

Une meilleure évaluation de l'impact environnemental des micropolluants passe par une meilleure connaissance des caractéristiques et du devenir de ces substances dans l'environnement (transferts, piégeage, dégradation, transformation...).

Qui plus est, le recours à des outils, **de type indicateurs biologiques, permet de mieux caractériser les effets** de la présence de ces micropolluants dans les différents compartiments environnementaux (voir page 86).

QUELQUES RÉSULTATS

Plusieurs études menées sur différentes espèces de poissons (vairon, poissons zèbres) ont montré des effets extrêmement marqués sur la reproduction (féminisation des mâles, diminution de la fertilité...) pour des concentrations en éthinylestrodiol (œstrogène le plus utilisé au monde dans les pilules contraceptives) inférieures au ng/L (Chocat, 2014). Une étude menée à Lyon en lien avec le développement de biocapteurs algaux pour la surveillance des milieux a montré que les rejets urbains de temps sec comme de temps de pluie ont un impact préjudiciable pour le compartiment algal (producteurs primaires). Ils modifient les activités enzymatiques, la croissance cellulaire et la fluorescence chlorophyllienne d'une communauté algale modèle (*Chlorella vulgaris*). Les algues sont donc potentiellement de bons bio-indicateurs de pollution (Ferro, 2013, Gosset, 2018). L'exposition aux antibiotiques peut avoir des effets néfastes pour le biote aquatique. Par exemple, le sulfaméthoxazole peut être très toxique pour les bactéries du milieu, les invertébrés et pour certains poissons. Ses sous-produits peuvent aussi être très toxiques pour les petits crustacés (*Daphnia magna*) (Soares, 2016).



Famille / Sous-famille	Types de toxicité
HAP	Cancérogènes (surtout benzo[<i>a</i>]pyrène), effets perturbateurs endocriniens suspectés.
PCB	Perturbateurs endocriniens et cancérogènes.
PBDE	Troubles du développement, effets sur le foie et la thyroïde (études expérimentales sur des animaux), effets sur l'Homme mal connus.
Solvants chlorés	Intoxications, effets neurologiques et/ou cancérogènes sur le foie et le sang.
Solvants benzéniques	Grande toxicité pour les cellules sanguines et moelle osseuse, cancérogènes (surtout le benzène).
Chloroalcanes	Cancérogènes.
Chlorophénols	Toxiques pour les organismes aquatiques. Irritations (peau et muqueuses), atteintes aux appareils digestif et respiratoire, au système nerveux, effets sur le cœur, le foie, le rein (intoxications accidentelles dans le cadre professionnel).
Chloroanilines	Très toxiques pour les organismes aquatiques. Toxiques pour l'Homme : atteintes respiratoires, méthémoglobinémie.
Alkylphénols	Potentiels perturbateurs endocriniens (miment l'action des œstrogènes).
Phtalates	Toxicité directe faible pour l'écosystème aquatique (faible solubilité dans l'eau). Effets perturbateurs observés sur des poissons, cancérogène (DEHP).
Bisphénol A	Potentiel perturbateur endocrinien sur la faune aquatique et sur l'Homme.
MTBE (méthyl-tert-butyl éther)	Atteintes aux systèmes nerveux, respiratoire et digestif de la souris, effets sur l'Homme mal connus.
Pesticides	Cancérogènes (leucémie, gliome), effets immunitaires, neurologiques ou troubles de la reproduction, réactions allergiques (selon le mode de pénétration dans l'organisme).
Biocides	Forte suspicion de cancérogénicité (formol), d'allergies ou d'effets perturbateurs endocriniens.
Produits pharmaceutiques	Eventuels effets à long terme, en cas de synergie notamment.

Tableau 1 : Effets toxiques des micropolluants d'après le guide des substances toxiques de l'*AESN-Aquascope*, 2008.

IMPACTS SANITAIRES

Bien que fortement suspectés, les risques sanitaires liés à l'exposition chronique des micropolluants sont encore peu documentés. Mais des études épidémiologiques ont montré des effets des phtalates sur la fertilité et le développement des nouveau-nés et des effets de perturbations endocriniennes, reprotoxiques et cancérogènes par le bisphénol A (Tableau 1). L'être humain est exposé aux micropolluants à travers différentes voies : inhalation (air, particules atmosphériques), contact cutané (cosmétiques, produits de soins corporels), ingestion (aliments, eau, médicaments). Par exemple, en baie de Seine, la pêche de certains poissons (sardines et anguilles) et crustacés (bulots) est interdite du fait de leurs teneurs élevées en PCB et cadmium respectivement. Il est important de noter que l'eau de boisson

est un vecteur d'exposition moindre comparé aux produits issus de l'agriculture ou de la pêche.

La frontière entre impact sanitaire et impact environnemental est ténue. Ainsi, des milieux aquatiques dégradés (superficiels et/ou souterrains) peuvent constituer une menace sur le long terme pour la ressource en eau potable. La contamination des milieux aquatiques est un « indicateur » du risque sanitaire global lié aux micropolluants.

SANTÉ ENVIRONNEMENTALE

On assiste depuis peu au développement du concept de « santé environnementale ». Cette notion s'intéresse à la façon dont l'environnement détermine de manière décisive la santé des individus, et plus largement leur bien-être, tant en les affectant

de manière positive que de manière négative par l'exposition aux nuisances, aux pollutions et aux risques : pollution de l'air et des milieux. En ce sens, certaines collectivités commencent à se préoccuper du risque lié à une exposition de leurs habitants aux micropolluants et à mettre en œuvre des plans d'action visant à réduire ces expositions (dans l'air intérieur, dans les espaces publics, dans l'alimentation...). C'est le cas de la ville de Paris et de son plan de prévention de santé environnementale sur le modèle du Plan santé environnement national (PNSE 3) et régional pour la région Ile-de-France.

Les connaissances sur l'impact environnemental et sanitaire des micropolluants restent *in fine* parcellaires.

De la toxicité intrinsèque d'un micropolluant à la somme des expositions environnementales

Un « effet toxique » est la conjonction de la toxicité intrinsèque d'une substance vis-à-vis d'une espèce vivante (de l'être humain, d'un animal ou d'un végétal) et de son exposition à la substance.

$$\text{Risque} = \text{Danger} \times \text{Exposition}$$

Dans la pratique, la grande difficulté est d'évaluer cette exposition. En effet,

- la toxicité peut être chronique ou ponctuelle,
- les voies d'expositions sont nombreuses,
- de nombreuses substances sont présentes simultanément (plus de 100 000 substances chimiques répertoriées en Europe⁴).

EXPOSITION ET BIODISPONIBILITÉ

L'exposition des organismes à un micropolluant dépend de la distribution des micropolluants entre les différents compartiments du milieu (voir page 50), du niveau d'imprégnation du milieu dans lequel ils vivent et plus particulièrement de la fraction biodisponible de ce polluant.

Pour les microorganismes (premiers maillons de la chaîne alimentaire), la fraction biodisponible correspond à la fraction dissoute et libre (non complexée) des micropolluants.

***Exemple :** les micropolluants hydrophobes (HAP lourds, PCB, PBDE...) étant préférentiellement stockés dans les sédiments, ils représentent un risque direct pour les organismes, vivant ou se nourrissant dans les sédiments, ainsi que pour les organismes supérieurs qui s'en nourrissent. D'autres micropolluants comme*

les solvants chlorés et le méthyl tert-butyl éther (MTBE) sont très volatils et sont donc susceptibles d'être inhalés. Enfin les micropolluants très hydrophiles comme les pesticides sont susceptibles d'atteindre les nappes souterraines et la ressource en eau potable qu'elles représentent.

Remarque : les matières organiques dissoutes des rejets urbains sont susceptibles de modifier (augmenter ou diminuer) la biodisponibilité des micropolluants dans le milieu (voir page 50).

EFFETS COCKTAILS (SYNERGIE)

De nombreuses substances toxiques présentent des effets synergiques (augmentation, atténuation) des toxicités lorsqu'elles sont en présence d'autres micropolluants. C'est ce qu'on appelle couramment l'**effet « cocktail »**. Ainsi, en présence de certains mélanges, les valeurs des « doses sans effet » sont abaissées. Dans l'environnement ou dans les modes d'exposition de l'Homme, il est très difficile d'évaluer ces effets de synergie car le nombre de combinaisons de micropolluants est quasi-infini. Il n'existe pas actuellement de méthodologie, ni d'outil certifié, robuste, de coût acceptable, permettant de quantifier simplement et efficacement tous les risques associés aux mélanges complexes de molécules. Des travaux d'écotoxicologie menés par l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) et l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) se basent sur l'identification de « mélanges clés » de pesticides (ceux auxquels le consommateur est le plus souvent exposé) qui sont ensuite testés dans différents systèmes biologiques afin d'évaluer si le mélange est plus toxique que les constituants pris séparément.

***Exemple :** l'effet synergique de deux insecticides a été testé. La toxicité des pyréthrinoides (organochlorés) à une dose donnée est multipliée par 10 si elle est en présence d'une dose équivalente de pipéronyl butoxide. Le cuivre et les organophosphorés ont également des effets toxiques synergiques sur la faune aquatique (AESN-Aquascop, 2008).*

D'une manière générale, avec les micropolluants, le principe selon lequel « rien n'est poison, tout est poison, seule la dose fait le poison » (Paracelse, 1537) perd en partie de sa validité.

PRODUITS DE DÉGRADATION ET MÉTABOLITES

Dans les milieux, la dégradation des micropolluants conduit à la formation de métabolites (par biodégradation) et de produits de dégradation (par dégradation abiotique). Le problème réside dans le fait que ces composés sont parfois plus toxiques, plus bioaccumulables, plus persistants que les molécules initiales. **Actuellement, la prise en compte de ces produits de dégradation est encore rare dans les démarches de surveillance des micropolluants.**

4. Substances ayant un numéro EINEC qui permet d'identifier une substance chimique répertoriée dans l'inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes.

Exemple : après une prise de médicament par un patient, les molécules actives sont partiellement dégradées par des enzymes, en particulier au niveau du foie et utilisées par le corps humain. On dit qu'elles sont métabolisées. La molécule d'origine et les métabolites sont en partie excrétés par l'organisme, principalement dans les urines et, dans une moindre mesure, dans les fèces. Ces modifications ne sont pas systématiques et les taux d'excrétion varient selon les médicaments. Le taux d'excrétion peut être utilisé pour quantifier ces processus et l'apport de molécules dans le système d'assainissement (Pouzol, 2018).

Approche réglementaire

La caractérisation des dangers associés aux micropolluants est testée substance par substance en laboratoire dans des études sur des espèces animales pertinentes dans le but d'estimer les niveaux d'expositions sans effet apparent. Les doses de références humaines communément considérées comme des niveaux sûrs d'exposition sont extrapolées à partir de ces études (Figure 3).

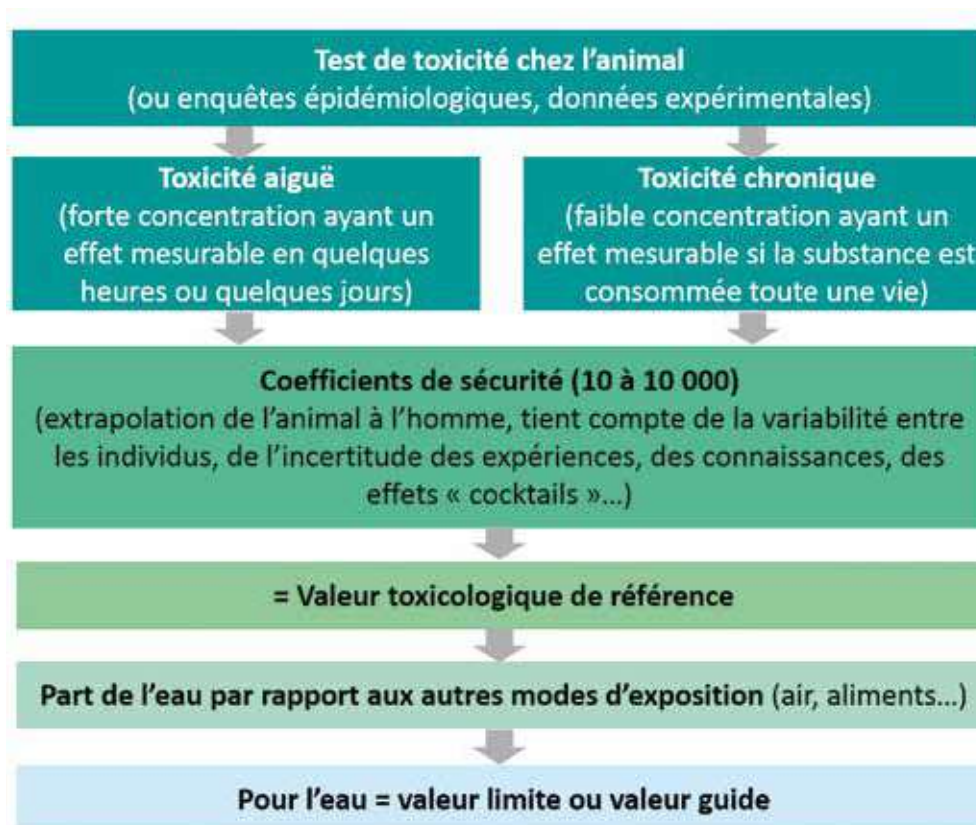


Figure 3 : Démarche pour la détermination des valeurs limites réglementaires ou des valeurs guides (non réglementaires, d'après *Les cahiers eau service*, n°34, 2011).

CAS DES NORMES ENVIRONNEMENTALES

Les normes de qualité environnementales ont été établies par l'INERIS (pour la France) dans le cadre de la DCE (2000/60/CE). Elles reposent sur des valeurs seuils calculées pour chacun des compartiments aquatiques : eau, sédiments et biote. La valeur retenue comme NQE correspond à la plus faible valeur des différents compartiments afin de protéger le plus sensible. Ces normes évoluent en fonction des progrès analytiques et des résultats d'études expérimentales ou épidémiologiques.

CAS DES NORMES ALIMENTAIRES

Dans le domaine sanitaire, les normes reposent principalement sur le calcul de doses journalières admissibles (DJA). Il s'agit de la quantité d'une certaine substance qu'un individu peut ingérer quotidiennement et pendant toute sa vie sans risque. A partir de ces DJA, les doses maximales de résidus de pesticides (LMR) sont établies pour les produits issus de l'agriculture.

Une surveillance partielle

Les programmes de surveillance des milieux et des rejets ainsi que les politiques publiques et les programmes d'action de réduction en amont ont permis une nette diminution des concentrations de certains micropolluants (cadmium, plomb, PCB...). Ce qui se traduit notamment par une baisse des teneurs en micropolluants dans les boues de STEU. Néanmoins, cette surveillance, basée sur des listes de micropolluants ([voir page 78](#)), ne peut garantir qu'une protection imparfaite face aux très nombreuses substances chimiques dont les risques ne sont pas encore évalués.

Eaux urbaines : sources de micropolluants vers le milieu aquatique

Les zones urbaines génèrent un grand nombre de micropolluants ([voir page 30](#)) qui sont véhiculés jusqu'au milieu aquatique via les retombées atmosphériques, les rejets de STEU, les eaux pluviales et les surverses unitaires de temps de pluie issues des déversoirs d'orage. Les systèmes aquatiques situés à l'aval des grandes agglomérations sont donc généralement impactés. Ces effluents sont rejetés avec ou sans traitement vers les eaux de surface mais aussi vers les eaux souterraines via les ouvrages d'infiltration ([voir pages 58 et 62](#)). Les travaux des observatoires du réseau Urbis participent activement à la caractérisation de ces rejets.



Quelle réglementation pour les micropolluants de la ville au milieu récepteur ?

Essentiel

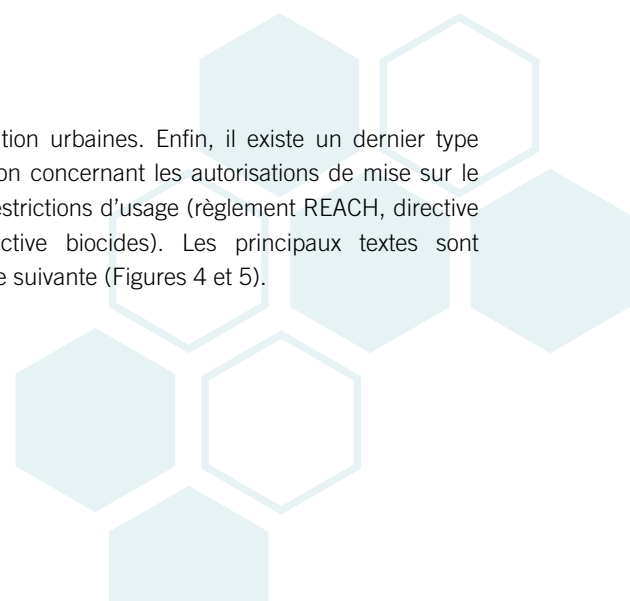
En France les textes réglementaires visant spécifiquement les micropolluants se déclinent sur plusieurs niveaux :

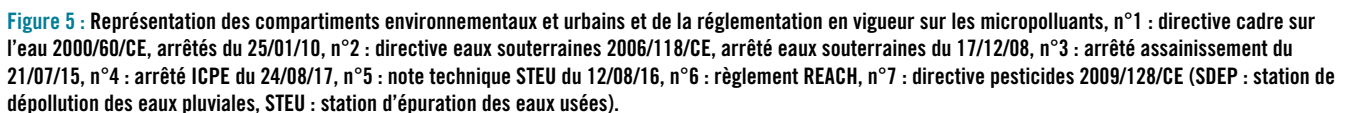
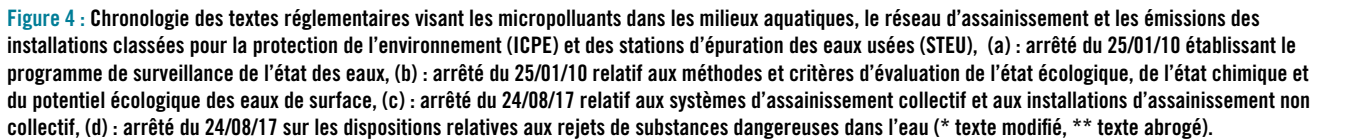
- **la protection et la restauration des milieux aquatiques** : la directive européenne cadre sur l'eau (2000/60/CE) liste les substances prioritaires et dangereuses prioritaires à réduire et supprimer pour atteindre le bon état chimique des masses d'eau. Les arrêtés du 25 janvier 2010 (modifiés par les arrêtés du 7 août 2015 et du 27 juillet 2015) établissent le programme de surveillance de l'état des masses d'eaux et les critères d'évaluation de l'état (chimique et écologique) de celles-ci. Pour les eaux souterraines ce sont la directive du 12 décembre 2006 (modifiée par la directive du 20 juin 2014) et l'arrêté du 17 décembre 2008 qui encadrent la protection contre la pollution et la détérioration.
- **les prescriptions de l'assainissement** : l'arrêté du 21 juillet 2015 (modifié par l'arrêté du 24 août 2017) est le texte de référence pour la surveillance de la collecte, du traitement et l'évacuation des effluents en assainissement collectif (et installations non collectives de charge supérieure à 1,2 kg/j de DB05).
- **la surveillance des rejets des ICPE et des STEU** : les campagnes de l'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE) débutées en 2002, ont conduit à la mise en place d'une surveillance réglementaire des émissions de certaines installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, arrêté du 24 août 2017) et des stations de traitement des eaux usées urbaines (STEU, note technique du 12 août 2016).
- **les autorisations de mise sur le marché (règlement REACH) et de restrictions d'usage (directive cadre 2009/128/CE « utilisation durable des pesticides ») de certaines substances.**

En parallèle de ces textes réglementaires, la lutte contre les micropolluants s'articule autour de différents plans nationaux (plan national Micropolluants 2016-2021, plan national Santé-Environnement 3, plan Ecophyto II, plan Ecoantibio). Les résultats de ces programmes sont susceptibles de venir renforcer le cadre réglementaire des micropolluants.

La réglementation française concernant les micropolluants vise à protéger les milieux récepteurs et s'appuie sur les directives européennes. D'abord sur les niveaux de concentrations dans les milieux aquatiques avec la directive cadre sur l'eau 2000 (2000/60/CE) puis sur la réglementation liée à l'assainissement et aux autorisations de rejets des installations classées et des

stations d'épuration urbaines. Enfin, il existe un dernier type de réglementation concernant les autorisations de mise sur le marché et les restrictions d'usage (règlement REACH, directive pesticides, directive biocides). Les principaux textes sont détaillés en page suivante (Figures 4 et 5).





Suivi réglementaire

DANS LES MILIEUX AQUATIQUES

En France, les lois sur l'eau de 1964 et 1992 ont permis de fixer un cadre pour une gestion intégrée des eaux, par grand bassin hydrographique. La directive n°76/464/CEE du 4 mai 1976 déterminait une réglementation générale pour la pollution causée par certaines substances dangereuses (150 substances) déversées dans le milieu aquatique.

Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE

Complétée par les directives filles sur les substances prioritaires 2008/105/CE et 2013/39/UE

La directive cadre sur l'eau adoptée en 2000, fixe des objectifs de préservation, restauration des masses d'eaux superficielles et souterraines à l'horizon 2015. L'objectif de bon état chimique consiste à respecter les normes de qualité environnementales (NQE) pour une liste de substances ou famille de substances définie par la DCE : initialement 33 substances prioritaires dont treize prioritaires et dangereuses (annexe X de la DCE) auxquelles s'ajoutent huit substances issues de la liste 1 de la directive 2006/11/CE. L'annexe X de la DCE a été mise à jour successivement par les directives sur les substances prioritaires 2008/105/CE et 2013/39/UE, cette dernière apportant des modifications de certaines NQE et ajoutant douze nouvelles substances à la liste des substances prioritaires.

En France, la directive cadre sur l'eau se décline en schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) qui fixe les objectifs environnementaux par grand bassin hydrographique.

Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement

Modifié par l'arrêté du 7 août 2015

En 2010, l'arrêté du 25 janvier précise les dispositions du suivi quantitatif et la surveillance de l'état chimique des masses d'eau. L'arrêté de 2015 précise les polluants spécifiques de l'état écologique (PSEE) à suivre par bassin hydrographique (PSEE passés de 9 pour le SDAGE 2010-2015 à 20 pour le SDAGE 2016-2021 sur le bassin Seine-Normandie). Il liste également les substances pertinentes à surveiller (SPAS) en métropole et dans les départements d'outre-mer.

Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

Modifié par l'arrêté du 27 juillet 2015

Un deuxième arrêté du 25 janvier 2010, mis à jour également en 2015 précise les méthodes et les critères d'évaluation de l'état chimique et écologique des masses d'eau. Il liste les NQE des différents micropolluants de l'état chimique et des PSEE et précise ceux pour lesquels les NQE sur le biote doivent être prises en compte. Il explique notamment que si un seul polluant ou groupe de polluants de la liste dépasse la NQE, le site d'évaluation est classé en « mauvais état ».

Directive du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration

Modifiée par la directive du 20 juin 2014

Cette directive est la déclinaison de la DCE 2000 pour les eaux souterraines. Elle comprend des mesures d'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines, l'identification et l'inversion des tendances à la hausse significatives et durables. Les polluants ciblés sont l'arsenic, le cadmium, le plomb, le mercure, le trichloréthylène et le tétrachloréthylène. Elle s'intéresse particulièrement aux contaminations par les produits phytopharmaceutiques (définis à l'article 2 de la directive 91/414/CEE) et les biocides (de l'article 2 de la directive 98/8/CE). Elle fixe une norme de qualité des eaux souterraines à 0,1 µg/L pour les pesticides et une somme à 0,5 µg/L (la somme de tous les pesticides détectés et quantifiés dans le cadre de la procédure de surveillance).

Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines

Modifié par l'arrêté du 2 juillet 2012

Il fixe notamment les valeurs seuils pour la liste minimale de paramètres retenus au niveau national par les états membres.



DANS L'ASSAINISSEMENT

Directive n° 91/271 du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires

La directive européenne du 21 mai 1991 instaure les bases de l'assainissement des eaux usées en fixant des types de traitement et des échéances (entre 1998 et 2005) en fonction des équivalents-habitants rejetés et des zones sensibles (redéfinies tous les 4 ans). Elle précise déjà que les États membres doivent veiller à ce que les quantités totales de substances toxiques, persistantes ou bioaccumulables contenues dans les boues de STEU déversées dans les eaux de surface soient soumises à autorisation et progressivement réduites. L'objectif final étant de supprimer le déversement des boues dans des eaux de surface.

Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif (ANC), à l'exception des installations ANC recevant une charge brute de pollution organique $\leq$ à 1,2 kg/j de DBO5

Modifié par l'arrêté du 24 août 2017, et abrogeant l'arrêté du 22 juin 2007

Cet arrêté concerne la collecte, le transport, le traitement et l'évacuation des eaux usées, en particulier en STEU et aux déversoirs d'orage mais ne s'applique pas aux eaux pluviales strictes. Il fixe les prescriptions techniques applicables à la conception, l'exploitation, la surveillance et l'évaluation de la conformité de ces systèmes d'assainissement. Il précise le cadre de la gestion des boues de STEU (article 9) et donne des prescriptions relatives aux micropolluants. Lorsque les eaux usées traitées sont infiltrées dans le sol, le maître d'ouvrage est tenu d'évaluer le risque de détérioration de la qualité de l'eau souterraine réceptrice par les substances dangereuses visées par l'arrêté du 17 juillet 2009 relatif à la protection des eaux souterraines (article 8). En cas de rejets compromettant l'atteinte du bon état de la masse d'eau, ou lorsque les concentrations dans les boues de STEU dépassent les valeurs réglementaires, le maître d'ouvrage doit procéder à une investigation sur le réseau de collecte et en particulier sur les principaux rejets non domestiques pour déterminer l'origine des micropolluants. Enfin, lorsque les STEU recueillent des eaux usées non domestiques, le préfet peut demander une surveillance complémentaire relative aux micropolluants dans les rejets de la station (articles n°17 et 18).

Contrôle des émissions

REJETS DES INSTALLATIONS CLASSÉES

L'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE), débutée en 2002, vise à renforcer la protection de l'environnement aquatique. Elle a conduit à la mise en place d'une surveillance réglementaire des émissions de certaines installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et des stations de traitement des eaux usées (STEU).

Note technique du 12 août 2016 relative à la recherche de micropolluants dans les eaux brutes et dans les eaux usées traitées de stations de traitement des eaux usées et à leur réduction

Abroge la circulaire du 29 septembre 2010

Cette note technique précise les modalités d'une stratégie de réduction des émissions de micropolluants à l'amont des stations de traitement des eaux usées (STEU) recevant une charge nominale supérieure à 600 kg/j de DBO5 (10 000 équivalents-habitants). Elle impose aux gestionnaires des STEU :

- une phase de recherche (eaux brutes et eaux traitées) qui permet d'identifier les micropolluants à enjeu pour la STEU concernée,
- une phase de diagnostic à l'amont de la STEU qui permet une meilleure compréhension des sources d'émission et une identification des actions de réduction pertinentes. Elle ne s'applique pas en l'état aux STEU dont les eaux usées traitées sont évacuées par infiltration dans le sol.

Arrêté du 24 août 2017 modifiant dans une série d'arrêtés ministériels les dispositions relatives aux rejets de substances dangereuses dans l'eau en provenance des installations classées pour la protection de l'environnement

Modifie l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation

Cet arrêté prend en compte les exigences européennes (2000/60/CE) et les enseignements de la deuxième campagne de RSDE (2009-2015). Il précise les concentrations maximales et les fréquences de prélèvements pour certains micropolluants spécifiques d'un secteur d'activité, et pour les autres substances de l'état chimique et l'état écologique des masses d'eaux.

Lorsque des substances dangereuses visées par un objectif de suppression des émissions sont présentes dans les rejets de l'installation, l'exploitant doit pouvoir prouver qu'il a mis en œuvre les solutions de réduction techniquement viables afin

de respecter cet objectif sauf s'il démontre que la substance dangereuse est présente en amont et qu'elle ne provient pas de son installation. Lorsqu'une installation est raccordée à une station d'épuration urbaine, les valeurs limites d'émission (VLE) de micropolluants en sortie sont les mêmes que pour un rejet dans le milieu naturel.

AUTORISATION ET RESTRICTION D'USAGE

Règlement (CE) n° 1907/2006 REACH

Le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques (REACH), entré en vigueur au 1^{er} juin 2007 vise à compléter les données sur les dangers et les risques associés aux substances. Les industriels sont tenus d'identifier et de gérer les risques liés aux substances qu'ils fabriquent et commercialisent dans l'Union européenne. Dans le cas contraire, les autorités peuvent restreindre l'utilisation des substances de plusieurs manières. Sur le long terme, les substances les plus dangereuses doivent être remplacées par des substances qui le sont moins.

Directive cadre européenne 2009/128/CE « utilisation durable des pesticides »

Elle a pour objectif de créer un cadre juridique européen commun pour parvenir à une utilisation durable des pesticides. En France, elle a conduit à la création du plan Ecophyto. A l'heure actuelle, elle ne concerne que les produits phytosanitaires. Les biocides pourraient cependant être également intégrés dans les années à venir.

Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

Modifie la loi n° 2014-110 du 6 février 2014 visant à mieux encadrer l'utilisation des produits phytosanitaires sur le territoire national

Elle interdit pour les collectivités l'utilisation des produits phytosanitaires pour les espaces verts, les voiries (hors autoroutes et pistes d'atterrissage), les forêts, et promenades depuis le 1^{er} janvier 2017 et entrera en vigueur pour les particuliers à partir de janvier 2009.

Et les eaux pluviales?

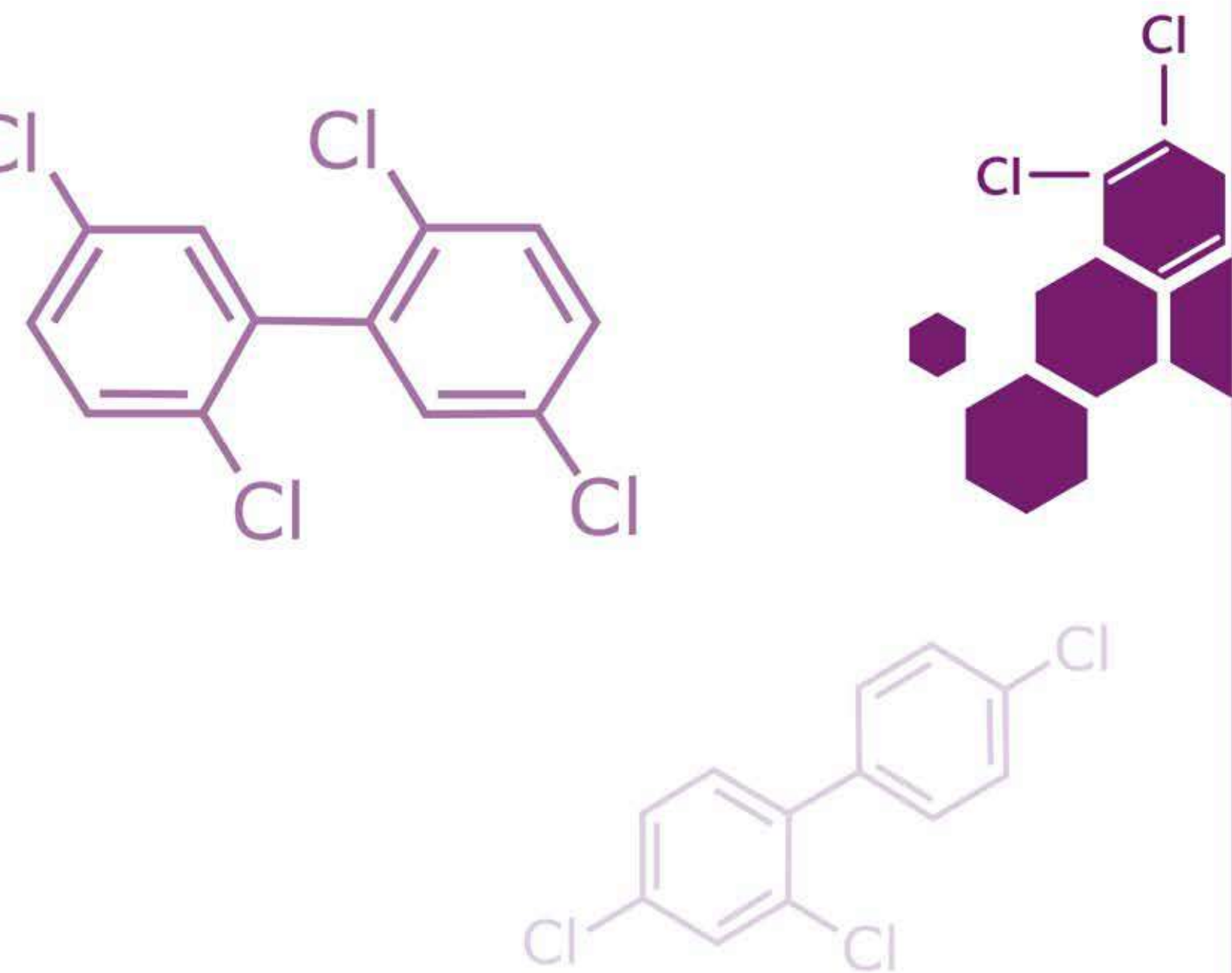
Si aucun texte ne réglemente explicitement les concentrations de micropolluants dans les eaux pluviales, certaines mesures de gestion des eaux pluviales peuvent avoir un impact sur les flux de polluants déversés dans le milieu. Ainsi les aménageurs sont largement incités par une série de normes relatives à la maîtrise des eaux pluviales à développer des « stratégies de contrôle à la source ». L'arrêté du 24 août 2017 relatif aux systèmes d'assainissement incite à une gestion des eaux pluviales le plus en amont possible pour limiter les apports d'eaux pluviales dans les systèmes de collecte ainsi que les déversements sans traitement vers le milieu (voir page 62). L'arrêté du 24 août 2017 concernant les rejets des ICPE précise que les eaux de ruissellement contaminées par les activités de l'installation doivent être collectées par un réseau spécifique et traitées.

Les plans nationaux

La lutte contre les micropolluants à l'échelle nationale est articulée autour du plan national de lutte contre les micropolluants (2016-2021), du plan national Santé Environnement 3 (PNSE3, 2015-2019), ou encore du plan Ecophyto II ou Ecoantibio II (2017-2021). Elle repose sur de nombreux acteurs : le ministère de la Transition écologique, l'Agence française pour la biodiversité, le laboratoire national de référence sur la surveillance des milieux aquatiques (AQUAREF), le comité d'experts de priorisation des substances (CEP), l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) et l'institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS). **Ces plans sont susceptibles de faire évoluer le cadre réglementaire des micropolluants.** En parallèle du travail réalisé par les services de l'Etat, les collectivités sont invitées à multiplier leurs actions en matière de gestion de l'eau et d'assainissement (voir page 73). Elles sont soumises aux différents codes : code de l'environnement, code de la santé publique, code général des collectivités territoriales. **S'ils ne sont pas spécifiques aux micropolluants, ces codes restent déterminants quant à la gestion des effluents et à la qualité des milieux.**



D'où viennent les micropolluants et en quelle quantité ?



2

30

D'où viennent les micropolluants en zone urbaine ?

35

Que sait-on de la signature et des niveaux de concentrations en micropolluants des eaux urbaines ?

41

Quelle est la contribution des différentes sources et voies de transfert aux flux de micropolluants ?



D'où viennent les micropolluants en zone urbaine ?

Essentiel

Les origines des micropolluants en zone urbaine sont nombreuses. S'il semble aisé d'identifier les sources de certains composés comme les parabènes et les résidus pharmaceutiques qui sont essentiellement liés aux eaux usées ou encore les HAP liés au trafic routier, d'autres, au contraire, comme les alkylphénols, ont de nombreuses origines liées à la multiplicité de leurs usages.

Les études montrent que les micropolluants retrouvés dans les eaux urbaines (usées et pluviales) proviennent de trois grands types de sources :

- les activités domestiques, artisanales, industrielles et le trafic routier,
- les surfaces urbaines (toitures, voiries) par les eaux de ruissellement de pluie et le nettoyage des chaussées,
- les pratiques d'entretien des espaces urbains (espaces verts, façades...).

En outre, les retombées atmosphériques peuvent apporter des micropolluants produits en dehors du bassin versant considéré.

Les données disponibles sur les sources de micropolluants restent parcellaires *puisque l'on ne trouve que ce que l'on cherche, là où on le cherche.*

Quels sont les sources et les vecteurs de micropolluants dans le milieu urbain ?

SOURCES DE MICROPOLLUANTS

Qu'ils soient volontairement synthétisés, involontairement produits, ou encore pour certains, d'origine naturelle, les micropolluants sont omniprésents dans le milieu urbain. Ils sont contenus dans les infrastructures urbaines (bâti, mobilier urbain, voiries...) et les objets qui nous entourent, dans les produits que nous utilisons quotidiennement et dans l'air que nous respirons.

Les sources de micropolluants peuvent être regroupées en trois typologies (*Petrucci et al., 2014*) : celles qui sont liées aux activités (trafic automobile, industries, usages domestiques), celles qui sont liées à l'occupation des sols (nature des surfaces urbaines) et celles qui sont liées aux pratiques individuelles ou collectives (entretien des espaces verts, Tableau 2). Toutes ces substances n'ont pas la même probabilité de se retrouver dans

les eaux urbaines et les milieux aquatiques. Cela dépend de leur exposition et de leur utilisation. Les micropolluants appliqués sur les surfaces seront plus facilement lessivés que ceux entrant dans la composition d'un matériau. Pour caractériser la contamination des eaux par les micropolluants il est donc indispensable de bien connaître les sources mais aussi les modes d'utilisation des différentes substances, de même que leur devenir dans l'environnement (*voir page 50*).

VECTEURS DE MICROPOLLUANTS

En fonction de leurs origines, de leurs usages et de leurs voies d'émission, ces micropolluants sont ensuite véhiculés par différents vecteurs. Les retombées atmosphériques sont susceptibles d'apporter ou d'exporter des micropolluants au sein ou en dehors du bassin considéré et cette contribution ne doit pas être négligée, notamment lorsque l'on s'intéresse aux eaux de ruissellement. Les eaux usées, les eaux pluviales collectées dans les réseaux (séparatifs ou unitaires) et contenant des micropolluants seront directement ou indirectement (après traitement) rejetées dans le milieu.

Eaux urbaines	Type de Sources	Exemple de Sources
Eaux pluviales	Activités industrielles	- Dispersion chimique, accidents - Stockage de produits/matériaux/déchets
	Entretien des surfaces	- Pesticides, biocides, détergents, fondants chimiques, engrais
	Relargage des matériaux	- Chaussées, parkings : asphalte, bitume, ciment, peinture au sol, chantiers (voiries, constructions) - Bâti : matériaux de construction, infrastructures (métaux, ciments, bois, plastiques, polymères), peintures, pigments, joints ...
	Pratiques illicites	- Vidanges, rejets sauvages, déchets sur les chaussées
	Trafic auto	- Gaz d'échappement, additifs des carburants, fuites d'huile, usure des pneumatiques, freins et pots catalytiques, corrosion de la carrosserie, châssis...
Eaux usées	Activités domestiques	- Produits d'entretien, produits cosmétiques et pharmaceutiques
	Industries & artisanat	- Rejets au réseau industriels et de l'artisanat
	Rejets hospitalier	- Produits d'entretien, produits de diagnostic médicaments,

	Sources liées aux activités
	Sources liées aux pratiques
	Sources liées à l'occupation des sols et surfaces

Tableau 2 : Sources primaires des micropolluants en milieu urbain (modifié d'après Zgheib, 2009).

MICROPOLLUANTS SPÉCIFIQUES ET UBIQUISTES

Certains composés ont des sources facilement identifiables comme les parabènes ou les résidus pharmaceutiques qui proviennent en grande partie des usages domestiques et sont restreintes aux eaux usées ou encore les HAP qui sont essentiellement produits par le trafic automobile et sont davantage retrouvés dans les eaux pluviales. D'autres sont des micropolluants ubiquistes (alkylphénols, métaux) qui se retrouvent dans les différentes eaux urbaines et il apparaît très complexe d'identifier clairement leur origine.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de lister l'ensemble des sources et encore moins de lister de façon exhaustive les micropolluants qui en sont issus. Certaines sources de micropolluants ont été particulièrement étudiées au sein des observatoires d'Urbis, comme les éléments de construction, le trafic automobile ou les pratiques domestiques.

Les micropolluants liés aux activités urbaines

LES ACTIVITÉS PROFESSIONNELLES

Les activités industrielles sont responsables de l'émission d'un très grand nombre de micropolluants via leurs rejets d'eaux usées ou via des accidents lors du stockage ou du transport de substances. Néanmoins, depuis les années 2000, l'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE) par les installations classées a permis une diminution des micropolluants dans les rejets industriels arrivant au réseau et une bonne connaissance des micropolluants susceptibles d'être émis par les différents secteurs d'activité. Les effluents artisanaux sont rarement traités avant de rejoindre les réseaux. Des travaux sont actuellement

en cours sur la caractérisation de ces effluents jusqu'alors peu considérés (projet Lumieu'Stra⁵). On peut également citer les rejets hospitaliers qui émettent de nombreuses substances pharmaceutiques et produits de diagnostic (agents de contrastes) excrétés en grande partie avec les urines des patients, mais aussi des produits détergents et biocides utilisés dans les établissements (voir page 41).

LES ACTIVITÉS DOMESTIQUES

Un très grand nombre de micropolluants provient de nos usages domestiques. Les produits d'entretiens (nettoyants, désinfectants...), les soins corporels (gels douches, crèmes...) ou encore les médicaments sont autant de micropolluants pour lesquels la part domestique est importante. Les différences de pratiques de consommation induisent une grande variabilité des substances et des quantités émises vers les eaux usées.

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

Des travaux menés sur les eaux grises (eaux domestiques hors eaux vannes) ont cherché à déterminer les principales sources de certains micropolluants figurant dans de nombreux produits domestiques (Deshayes, 2015 et Zedek, 2016). Il s'agit des alkylphénols et des phtalates qui sont utilisés comme détergents et plastifiants ainsi que les parabènes, triclosan et triclocarban utilisés comme biocides dans les produits cosmétiques.

- A l'échelle d'une douche, il s'avère que les produits utilisés (gels douche, savons, shampoings) sont la source majeure d'alkylphénols et de phtalates (pour le di-n-butyle (DNBP)).
- En revanche, les parabènes, le triclosan et le triclocarban proviennent à part égale de ces produits et des « individus » qui prennent leur douche. Cela peut être attribué à l'application préalable de cosmétiques sur la peau par ces individus.
- A l'échelle du lave-linge, les produits (lessives, assouplissants) apportent l'essentiel des alkylphénols (nonylphénols) et du DNBP. De façon plus inattendue, les vêtements sont la source de plus de 50 % des phtalates (DEHP, DEP et BBP) et plus de 80 % des parabènes mesurés (test sur un lavage en machine sans produits). L'origine de ces micropolluants sur les vêtements n'est pas encore déterminée. Il pourrait néanmoins provenir de la composition des fibres textiles, ou bien des dépôts de poussière (extérieure et intérieure) accumulés au cours de la journée ou encore par transfert des produits cosmétiques depuis la peau.

LE TRAFIC AUTOMOBILE

Le trafic automobile représente une source majeure de micropolluants émis vers l'atmosphère et les eaux de ruissellement. En dehors des pollutions accidentelles, les modes d'émissions de micropolluants par les véhicules sont nombreux. Ils comprennent :

- **le lessivage des matériaux extérieurs** : les matériaux constituant les nombreuses pièces exposées au lessivage, comme les garnitures de freins, les pneumatiques et les carrosseries sont susceptibles de se déposer sur les chaussées et d'être entraînés par les eaux de ruissellement,
- **les fuites de fluides** : les huiles et carburants sont composés d'un grand nombre d'additifs, pouvant représenter jusqu'à 25 % de leur volume. Les huiles moteurs, les huiles lubrifiantes, certains liquides (lave-glace, liquides de freins ou de refroidissement) et bien sûr les carburants sont donc autant de sources de micropolluants vers les eaux de ruissellement,
- **les émissions (gaz et particules)** provenant de la combustion des carburants sont libérées vers l'atmosphère et pourront se redéposer directement ou via les retombées atmosphériques (sèches ou humides) au sein ou à l'extérieur du bassin d'origine.

Le trafic représente la source principale de HAP et une source très importante de métaux dont les **quantités émises dépendent fortement du contexte (routier, autoroutier, densité du trafic)**. Ces émissions sont étudiées depuis longtemps.

QUELQUES RÉSULTATS

- Des travaux de modélisation ont montré que les concentrations de HAP dans les eaux pluviales d'un bassin caractérisé par une circulation importante peuvent être multipliées par trois comparé à un cas « sans trafic » (Masoud, 2014).
- Des flux unitaires de HAP et de métaux émis par un véhicule particulier ont été calculés par kilomètre parcouru sur l'autoroute A11 (Tableau 3). Ces flux tiennent compte de l'usure des différentes parties de la voiture, de la consommation de carburant et de l'usure du revêtement routier (Legret, 2001).

µg/km	HAP	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Véhicule essence	26,4	0,23	2850	17	150	1160
Véhicule diesel	36,5	0,23	2850	17	120	1170

Tableau 3 : Emissions unitaires d'un véhicule particulier (essence et diesel) pour un trajet autoroutier (Legret, 2001).

5. Projet faisant partie de l'appel à projets « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » portés par l'Agence française pour la biodiversité, les Agences de l'eau et le ministère de la Transition écologique et solidaire.

En plus des HAP et des métaux, le trafic émet également des alkylphénols, du bisphénol A, des composés organiques volatils dont les origines sont assez bien identifiées (Tableau 4).

	Garnitures de freins	Huiles	Usure des pneus	Liquides	Carburants	Carrosserie
HAP			+	+	+	+
NP				+		+
OP			++			
BPA			+	+		+
COV					+	
Pb	+					
Cu	++					+
Cd	+				+	
Cr						+
Zn	+	+			+	
Sb	+	+				
Ni						+

Tableau 4 : Exemple de sources pour différents micropolluants émis dans les eaux de ruissellement de voirie (NP : nonylphénols, OP : octylphénols, BPA : bisphénol A, COV : composés organiques volatils, synthèse des travaux Urbis).

D'autres substances ont été mesurées dans les eaux de ruissellement de voiries, sans que leur source n'ait été précisément déterminée. Il s'agit des organoétains, des phtalates, des polybromodiphényléthers (PBDE), des perfluorés, des dérivés de thiazole et triazole (utilisés dans les huiles et les pneus), des alkylbenzènes sulfonates linéaires (LAS). Ces composés font actuellement l'objet d'études menées en partenariat avec les observatoires d'Urbis (projets Roulépur (OPUR), Matriochkas (ONEVU) et Micromégas (OTHU)⁵).

Remarque : le trafic ferroviaire, en dehors des infrastructures citées plus haut, ainsi que le chauffage urbain, sont également responsables d'émission de HAP et de métaux.

Les sources liées à l'occupation des sols et aux surfaces émettrices

Lorsque les précipitations dépassent quelques dixièmes de millimètre, l'eau ruisselle sur les surfaces urbaines. À ce ruissellement sont associés des phénomènes d'érosion, de lessivage et d'entraînement des particules constituant les

surfaces urbaines ou déposées auparavant par temps sec. Selon la nature et la composition de ces surfaces, la contamination des eaux de ruissellement peut être extrêmement variable (voir pages 35 et 41).

LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Quel que soit le type de matériau, **le degré d'exposition aux eaux de ruissellement est déterminant pour le niveau d'émission de micropolluants**. Les toitures et éléments de toiture sont une source importante de micropolluants vers les eaux pluviales. Les autres éléments du bâti (façades, grilles), étant moins exposés au ruissellement, sont donc, dans la majeure partie des cas, des sources moins importantes en termes de flux de polluants. **Pour les éléments de construction, il faut également tenir compte de l'âge des matériaux** car les pratiques évoluent. Les différents alliages ou les additifs peuvent changer au cours du temps. Les constituants des toitures (rampants et accessoires) sont des sources significatives de métaux (Cd, Cu, Pb et Zn).

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

Treize matériaux classiquement utilisés sur les toitures franciliennes ont été testés en conditions contrôlées (Robert-Sainte, 2009). Une hiérarchisation de ces matériaux en termes d'émission de métaux (indice de contamination métallique calculé à partir des concentrations et des valeurs réglementaires des Cd, Ni, Pb, Cu et Zn) a pu être proposée (Figure 6).



Figure 6 : Émissions de métaux par des matériaux de toitures franciliennes calculée à partir des concentrations et des valeurs réglementaires des Cd, Ni, Pb, Cu et Zn (Robert-Sainte, 2009, anthrazincs : zincs re-patinés de couleur anthracite).

Les toitures terrasses ou certains éléments en polychlorure de vinyle (PVC), comme les gouttières ou les volets, sont également responsables d'émissions de micropolluants organiques comme les alkylphénols, le bisphénol A, mais aussi les organoétains (mono et dibutyl-étain) pour les PVC (Lamprea et al., 2017).

LES MATÉRIAUX DES INFRASTRUCTURES

Les matériaux des chaussées, souvent constituées de béton bitumineux, sont responsables d'émissions de HAP, alkylphénols et de métaux (Cr, Zn, Cu). Les peintures de signalisation au sol, les voies ferrées et accessoires (caténaires des trains, trams ou trolleys), les glissières de sécurité, l'éclairage, le mobilier urbain ou encore la signalisation émettent également des métaux retrouvés dans les eaux de ruissellement.

Les sources liées aux pratiques d'entretien

L'origine de la contamination des eaux urbaines en micropolluants peut être liée à la composition du matériau en lui-même (comme expliqué ci-dessus), ou à l'application de produits pour la mise en oeuvre, la maintenance et l'entretien. Parmi d'autres, on trouve : les **nanoparticules d'argent ou de titane** ajoutées dans les peintures pour apporter respectivement une résistance contre la colonisation bactérienne et comme pigment blanc ; les **produits biocides** appliqués sur les toitures, à l'image du **benzalkonium** utilisé comme anti-mousse sur les toitures ; les **pesticides, fertilisants et autres produits chimiques** employés pour l'entretien des espaces urbains privés ou publics.

Parmi les pesticides et biocides, cinq molécules semblent plus présentes que les autres dans les eaux de ruissellement urbaines : carbendazime, diuron, glyphosate, AMPA (produit de dégradation du glyphosate) et isoproturon. Ces composés sont majoritairement utilisés comme herbicides, à l'exception de la carbendazime qui est un fongicide. Néanmoins, la loi⁶ interdit depuis le 1^{er} janvier 2017 l'utilisation par les institutions des produits phytosanitaires pour les espaces verts, les voiries (hors autoroutes et pistes d'atterrissage), les forêts et promenades.

Pour les particuliers, cette loi devrait entrer en vigueur à compter de janvier 2019. Elle devrait permettre, à terme, la disparition de certaines substances (glyphosate, AMPA...) dans les eaux de ruissellement tandis que d'autres (diuron, carbendazime...) risquent de perdurer du fait de leur utilisation croissante comme biocides dans les revêtements de façades.

6. Loi Labbé, n°2014-110 du 06/02/14 visant à mieux encadrer l'utilisation des produits phytosanitaires sur le territoire national, modifiée par l'article 68 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte n°2015-992 du 17/08/15.

Que sait-on de la signature et des niveaux de concentrations en micropolluants des eaux urbaines ?

Essentiel

Dans une matrice donnée (eau usée, eau de ruissellement, eau pluviale), la fréquence de détection et la concentration d'un micropolluant définissent sa signature. **A l'échelle du bassin versant, de nombreux micropolluants sont ubiquistes et on les retrouve à la fois dans les eaux usées et les eaux pluviales.** Certains composés sont toutefois plutôt caractéristiques des eaux usées, comme les produits cosmétiques, ou des eaux pluviales, comme les pesticides. Toutefois, les mauvais branchements dans les réseaux peuvent modifier ces signatures. **La « signature » des eaux pluviales est très variable d'un bassin à un autre, mais aussi au sein d'un même site entre les différents événements pluvieux.** On constate un effet d'échelle sur la qualité des eaux pluviales avec des **concentrations plus faibles dans les eaux de ruissellement amont** (sauf dans le cas de surfaces particulièrement émettrices) que dans les eaux pluviales collectées à l'aval du réseau d'assainissement. **La signature des eaux usées est lissée à l'échelle d'un bassin versant** et présente de faibles variabilités (facteur deux), à l'exception d'activités industrielles ou artisanales particulièrement polluantes présentes dans le bassin.

Qu'entend-on par « signature » ?

La signature en micropolluants d'une matrice englobe la fréquence de détection d'une substance ainsi que sa concentration. La caractérisation de cette signature est fortement influencée par les molécules recherchées et la sensibilité des méthodes analytiques employées. Il est important de noter que la signature des eaux urbaines, même au sein d'un même type d'eau, est variable. Pour une même substance, la variabilité spatiale et temporelle des fréquences de détection ou des concentrations peut être importante et peut s'expliquer par différents facteurs :

- des caractéristiques propres des bassins considérés (types d'activités, d'occupation des sols),
- des caractéristiques des événements pluvieux,
- de l'évolution des pratiques individuelles et collectives (utilisation de produits de substitution, diminution de la consommation de certains produits),

- des différences analytiques (limites de détection, sensibilité...) employées lors des études et de leur évolution.

Cependant, en utilisant une même méthodologie entre différents bassins ou entre plusieurs événements, des tendances peuvent être observées.

Existe-t-il une différence de signature entre les eaux urbaines ?

Une des études les plus complètes menée au sein des observatoires d'Urbis (Zgheib, 2009) s'est attachée à rechercher un panel commun de 88 substances⁷ dans différentes eaux urbaines (voir pages 78 et 82). Cette étude a permis de comparer les signatures des eaux usées de temps sec et de temps de pluie en réseau unitaire, et des eaux pluviales en réseau séparatif. Parmi ces 88 substances recherchées, 28 se sont avérées être ubiquistes.

7. Les 88 substances étudiées (Zgheib, 2009) : métaux (x8), organoétains (x3), alkylphénols (x5), chlorophénols (x2), pesticides (x24), HAP (x16), PCB (x8), PBDE (x3), chloroalcanes (x1), phtalates (x1), BTEX (x5), composés organiques halogénés volatils (x7), chlorobenzènes (x5). Analysées dans les eaux usées de temps sec (Clichy et Sucy-en-Brie), les eaux pluviales en réseau séparatif (ZAC Paris Rive gauche et Noisy-le-Grand) et dans les surverses unitaires de temps de pluie (déversoir d'orage de Clichy).

Il s'agit essentiellement des HAP, polychlorobiphényles (PCB), alkylphénols, métaux (plomb, chrome, cuivre, zinc), l'AMPA et le DEHP (phtalate). Néanmoins, les concentrations peuvent être différentes selon les matrices. Certains micropolluants sont plus présents et plus spécifiques d'un type d'eau.

Ainsi, les eaux usées se distinguent par un nombre plus important de composés organiques volatils (COV) et de résidus pharmaceutiques, tandis que les eaux pluviales sont caractérisées par la présence de pesticides. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'en raison des mauvais branchements qui existent entre les réseaux séparatifs et unitaires, des mélanges sont possibles entre les différentes matrices et complexifient la caractérisation des signatures des différentes matrices.

***Remarque :** sur les 88 micropolluants étudiés, 22⁸ n'ont jamais été quantifiés ou détectés. Toutefois, la « non détection » d'un micropolluant ne permet pas de statuer sur son absence. En effet, une substance peut être réellement absente d'un échantillon ou bien présente à des niveaux auxquels les méthodes analytiques utilisées ne permettent pas de la détecter.*

SIGNATURE DES EAUX USÉES

Les concentrations de micropolluants dans les eaux usées sont d'une manière générale plutôt bien documentées (Tableaux 5 et 6). **A l'échelle de grands bassins urbains, la signature des eaux usées est peu variable** et on observe généralement des différences maximales de concentrations de l'ordre d'un facteur 2. Pour la majorité des micropolluants étudiés, les concentrations mesurées dans les eaux usées des grandes STEU parisiennes sont d'ailleurs très proches de celles obtenues dans le projet ANR AMPERES⁹ (Choubert et al., 2011) qui regroupe des STEU de bassins très diversifiés (ruraux, urbains, urbains denses). Dans certains cas particuliers, la présence d'industries ou d'artisanat dont les effluents ne sont pas prétraités peut entraîner des concentrations supérieures pour certains micropolluants. A l'inverse, une forte dilution des eaux usées par des eaux claires parasites peut diminuer l'ensemble des concentrations. Il est possible de hiérarchiser les micropolluants en fonction de leur occurrence et concentration dans les eaux usées (Tableaux 5 et 6).

- Parmi les polluants les plus fréquemment détectés et à des concentrations importantes (de 10 à 100 µg/L) on trouve certains résidus pharmaceutiques (ibuprofène, paracétamol, diclofénac), les détergents (alkylbenzène sulfonate linéaire : LAS), le DEHP (phtalate) et les nonylphénols (alkylphénols).
- Au contraire, certains pesticides (isoproturon, dieldrine), les hormones, les chlorophénols sont plus rarement détectés et à des concentrations faibles (de 0,001 à 0,01 µg/L).

SIGNATURE DES EAUX PLUVIALES

Au sein du réseau Urbis, la caractérisation de la signature des eaux pluviales est plus récente et les données disponibles sont synthétisées dans les Tableaux 5 et 6.

- Certains micropolluants sont présents à des concentrations importantes (>1 µg/L) comme le DEHP, les nonylphénols, et de nombreux métaux.
- En revanche, les composés perfluorés et les PBDE sont plus rarement détectés et présents à des concentrations plus faibles (<0,1 µg/L).

La signature des eaux pluviales est beaucoup plus variable que celle des eaux usées. Elle dépend de la typologie du bassin versant (occupation du sol, intensité des activités) mais aussi des caractéristiques de l'événement pluvieux. La variabilité inter-événementielle peut parfois être supérieure à la variabilité interbassins. On observe ainsi facilement des variations de concentrations d'un facteur 10 entre les différents bassins pour un même polluant.

SIGNATURE DES EAUX UNITAIRES DE TEMPS DE PLUIE

Les eaux unitaires de temps de pluie sont un mélange d'eaux usées (EU) et d'eaux de ruissellement (ER) dont les proportions varient entre les différents événements pluvieux. Les concentrations en micropolluants dans les eaux unitaires de temps de pluie (Tableaux 5 et 6) dépendent donc des concentrations dans les EU et les ER et de la proportion de chacun de ces effluents. En revanche, **pour les micropolluants véhiculés sous forme particulière dans les EU, les concentrations dans les eaux unitaires de temps de pluie peuvent être supérieures à celles mesurées dans les EU et ER.** Cela s'explique par le fait que les polluants hydrophobes, adsorbés sur les particules, sédimentent dans les réseaux par temps sec et sont remis en suspension lors des événements pluvieux lorsque le débit augmente (voir page 41).

Quels sont les niveaux de concentrations en micropolluants des eaux de ruissellement en amont

A l'échelle amont, c'est-à-dire en tête de bassin versant, les niveaux de concentrations peuvent être très variables d'une surface à une autre (ex : toitures/voiries, Tableau 7). Il est donc difficile de donner des valeurs de références pour les différents contaminants. Les projets de recherche en cours (Roulépur, Matriochkas et Micromégas¹⁰) devraient pouvoir compléter ces connaissances.

8. Les 22 substances jamais quantifiées dans l'étude de Zgheib, 2009 : métaux (x1), pesticides (x7), PCB (x1), PBDE (x3), chloroalcanes (x1), BTEX (x1), composés organiques halogénés volatils (x3), chlorobenzènes (x5).

9. Projet AMPERES : Analyse de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et les Eaux Superficielles (2006-2009). Projet ANR-05-ECOT-0001.

10. Projets faisant partie de l'appel à projets « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » portés par l'Agence française pour la biodiversité, les Agences de l'eau et le ministère de la Transition écologique et solidaire.

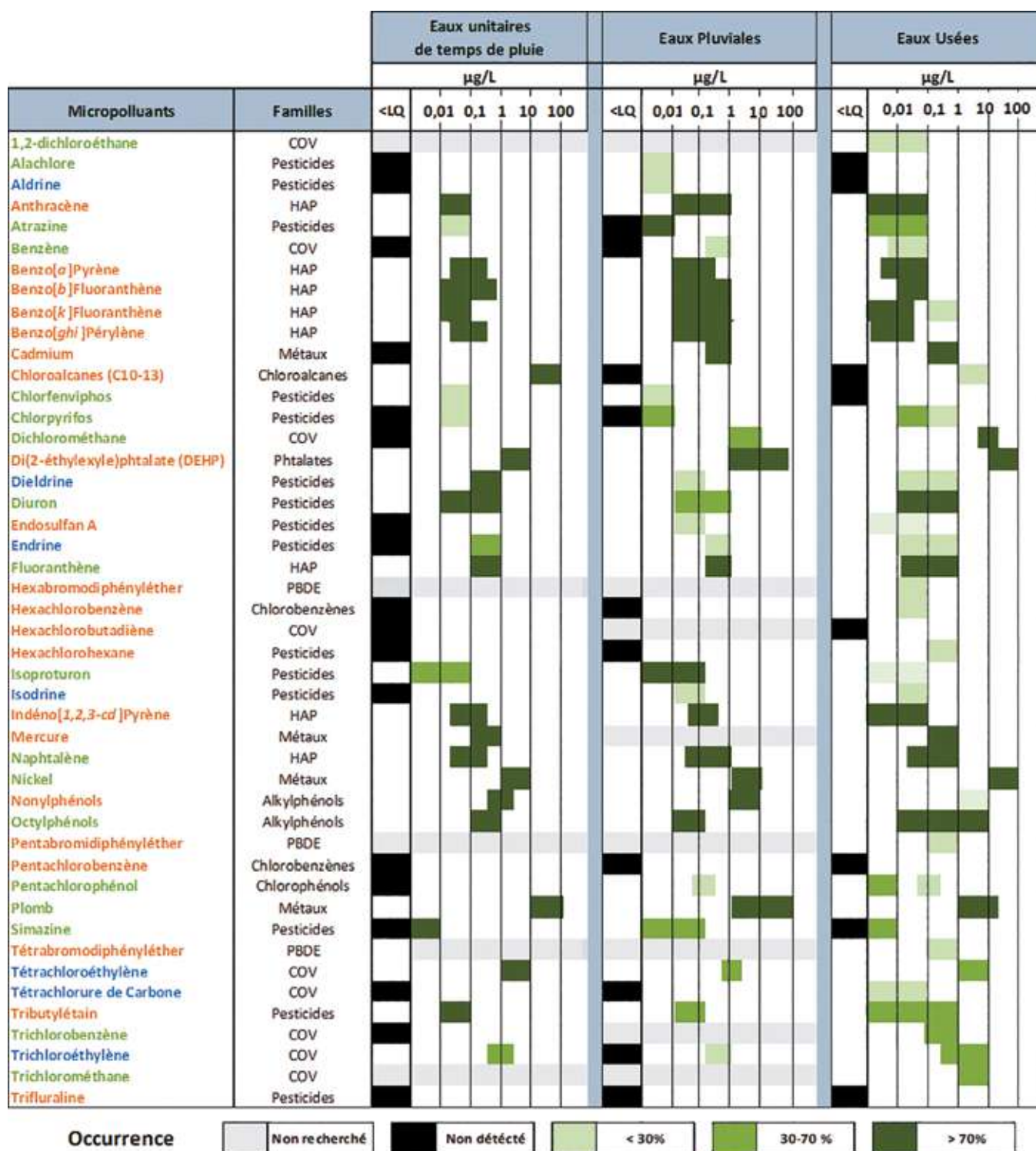


Tableau 5 : Concentrations (µg/L) et occurrences (%) des micropolluants réglementés dans les différentes matrices urbaines. Synthèse des travaux d'Urbis (Zgheib, 2009 ; Becouze-Lareure, 2010 ; Sebastian, 2013 ; Mailler, 2015) et AMPERES (Choubert et al., 2011) (orange : substances dangereuses prioritaires de la directive 2013/39/CE, vert : substances prioritaires de la directive 2013/39/CE, bleus : substances de la liste 1 de la directive 2006/11, COV : composés organiques volatils, < LQ : inférieure à la limite de quantification).

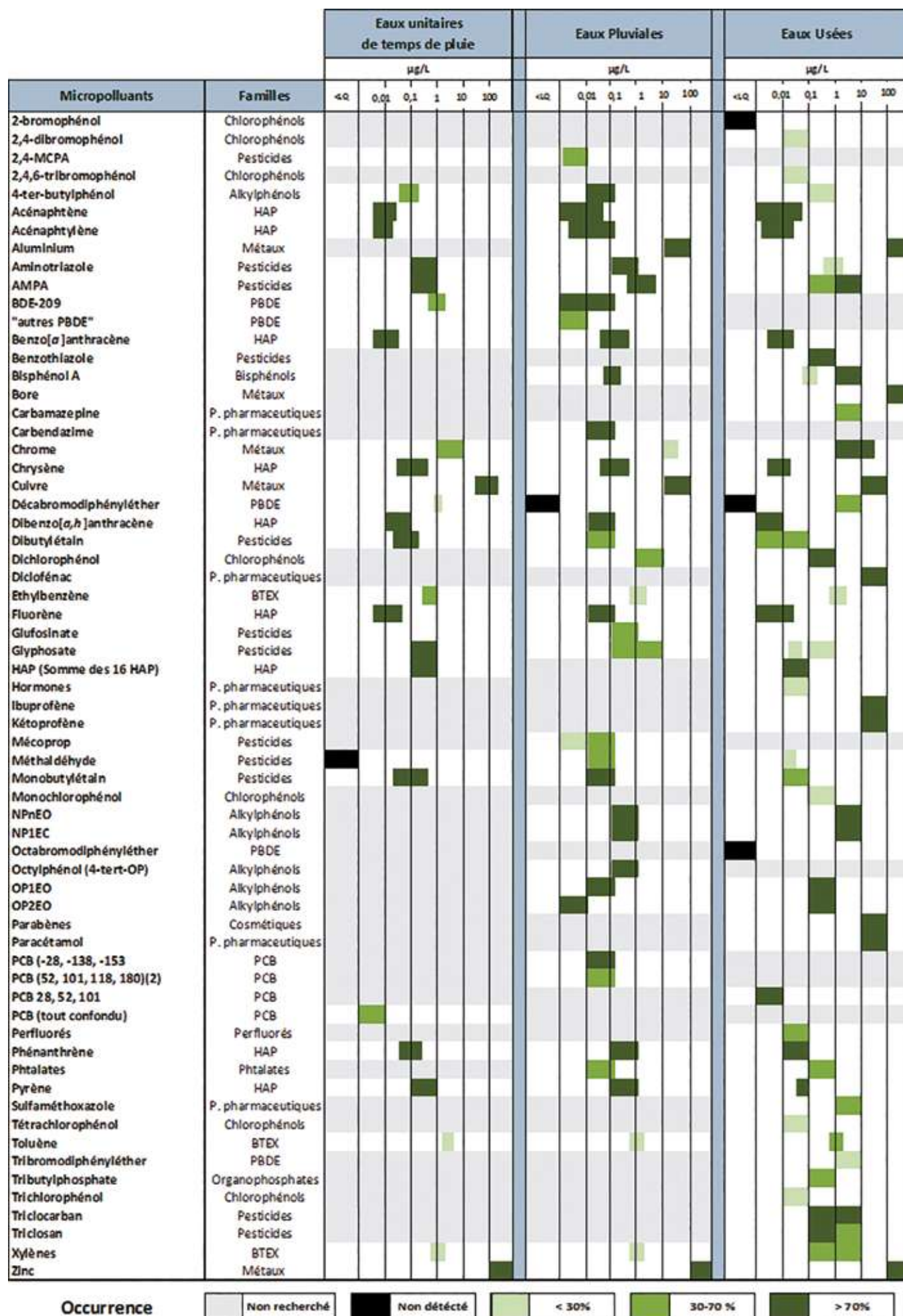


Tableau 6 : Concentrations (µg/L) et occurrences (%) des micropolluants hors DCE dans les différentes matrices urbaines. Synthèse des travaux d'Urbis (Zgheib, 2009 ; Becouze, 2010 ; Sebastian, 2013 ; Mailler, 2015) et AMPERES (Choubert et al., 2011) (P. pharmaceutiques : produits pharmaceutiques, < LQ : inférieure à la limite de quantification).

RUISSELLEMENT À L'ÉCHELLE DU QUARTIER

Une étude menée sur un quartier résidentiel dense de Seine-Saint-Denis (*Bressy, 2010*), caractérisé par un faible trafic routier et une proportion significative de toits en zinc, a montré qu'à l'exception de certaines surfaces très émettrices (ex toitures métalliques), les eaux de ruissellement amont sont moins contaminées en micropolluants que les eaux pluviales collectées à l'aval des réseaux (Tableaux 5, 6 et 7).

LES EAUX DE VOIRIE

Les eaux de ruissellement de voirie sont caractérisées par la présence de matières en suspension (MES), de métaux et d'hydrocarbures (Tableau 7). C'est la raison pour laquelle ces polluants ont été les plus étudiés. Comme cela a été démontré à grande échelle sur les eaux pluviales à l'aval de réseau, la densité de trafic automobile impacte directement les concentrations en MES, en HAP et en métaux.

Cette tendance est d'autant plus marquée pour le Cu, Ti, Zn et Pb et dans une moindre mesure pour Cd, As, Sr, Cr, Ni et V. Certaines études s'intéressent aujourd'hui à la contamination en pesticides des eaux de voirie en raison de leur fréquente utilisation pour l'entretien des chaussées urbaines et routières. Ces pratiques devraient significativement diminuer à l'avenir suite à l'interdiction depuis le 1^{er} janvier 2017 pour les

collectivités d'utiliser les pesticides pour l'entretien des espaces verts et des voiries notamment (loi de transition énergétique pour la croissance verte n°2015-992 du 17/08/15).

LES EAUX DE TOITURES

Parmi les surfaces imperméables présentes en milieu urbain dense, les toitures apparaissent comme les surfaces génératrices de plus de 50 % du volume total d'eau de ruissellement. Les concentrations en MES des eaux de toitures sont généralement inférieures à celles des voiries (d'un facteur 10, Tableau 7). Les concentrations en métaux sont très dépendantes de la nature des couvertures et des différents éléments constituant les toits (gouttières, encadrements de fenêtres, éléments d'étanchéité...). Les concentrations métalliques peuvent atteindre le mg/L (Tableau 7). Les concentrations en micropolluants organiques des eaux de toitures sont globalement les mêmes que dans les retombées atmosphériques. C'est notamment le cas des HAP et des PCB. Toutefois, des mesures réalisées sur différents types de toits ont montré des émissions de bisphénol A par des toits bitumineux (*Lamprea et al., 2017*) ou encore des concentrations importantes de benzalkonium (utilisés dans les produits de démaquillage de toitures) allant de 5 mg/L pour des toitures en béton à 27 mg/L pour des toitures en tuiles (pour les premiers millimètres de pluies des simulations en laboratoire, *Van de Voorde, 2012*).

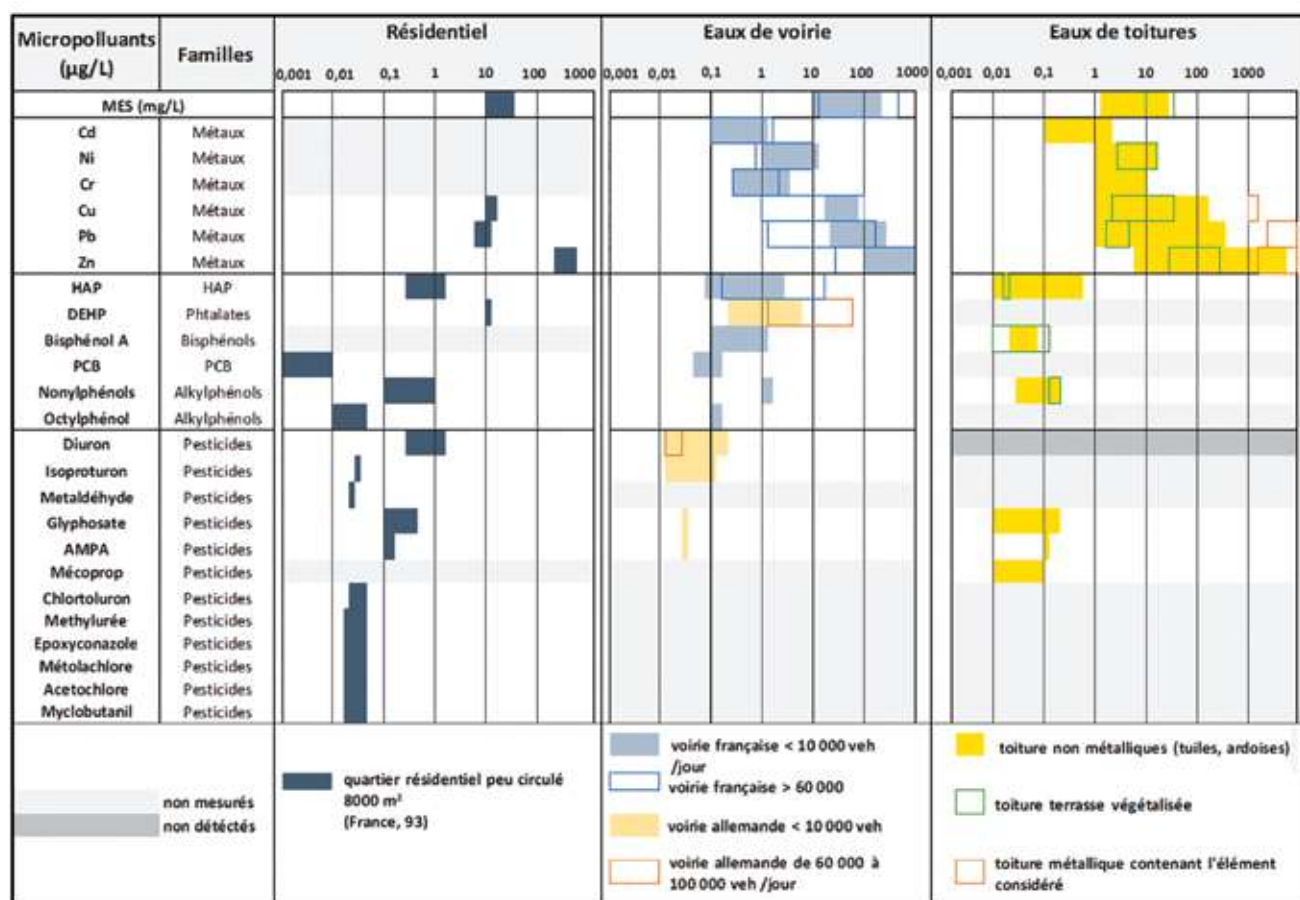


Tableau 7 : Synthèse des gammes de concentrations rencontrées dans les eaux de ruissellement à l'échelle du quartier résidentiel (*Bressy, 2010*), dans les eaux de voirie (*Lamprea, 2009 ; Stachel et al., 2010 ; El Mufleh, 2011 et Wicke et al., 2015*) et les eaux de toitures (*Gromaire, 1998 ; Lamprea, 2009 ; de Gouvello al. 2013 et Gromaire et al., 2014*).

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

COMPARAISON DES EAUX PLUVIALES DE TROIS BASSINS FRANÇAIS

Le projet ANR INOGEV¹¹ visait à étudier l'influence de l'occupation des sols et des activités locales sur la qualité des eaux pluviales. L'étude a porté sur 77 micropolluants¹² recherchés dans les eaux pluviales des bassins versants de type résidentiel du Pin Sec à Nantes et de Sucy-en-Brie en région parisienne ainsi que le bassin « industriel » de Chassieu à Lyon (Tableau 8, *Gasperi et al., 2013*).

	Pin Sec (Nantes)	Sucy-en-Brie (Paris)	Chassieu (Lyon)
Type	Résidentiel, habitations individuelles	Résidentiel, habitations collectives + individuelles	Industriel
Surface (ha)	30	228	185
Densité du trafic (véhicules.km/j)	10 000	60 000	36 000

Tableau 8 : Exemple de sources pour différents micropolluants émis dans les eaux de ruissellement de voirie. (NP : nonylphénols, OP : octylphénols, BPA : bisphénol A, COV : composés organiques volatils).

Pour un certain nombre de polluants, les gammes de concentrations rencontrées dans les eaux pluviales sont similaires (pas de différences significatives) entre les trois bassins (Tableau 9).

Ceci témoigne de la multiplicité des usages dans lesquels ils sont employés. Indépendamment des sites, les pesticides les plus couramment détectés sont le glyphosate, l'AMPA, le diuron et le glufosinate, présents à des concentrations pouvant atteindre plusieurs centaines de ng/L. En ce qui concerne les alkylphénols, une hiérarchie similaire des concentrations des différents composés a été observée dans les trois bassins :

$$4\text{-NP} > \text{NP1EO} \approx \text{NP1EC} > \text{NP2EO}$$

Remarque : les NP1EO, NP2EO et NP1EC sont des alkylphénols éthoxylés et carboxylés qui se dégradent en 4-NP dans l'environnement.

Familles	Micropolluants dont les concentrations sont similaires entre les 3 bassins versants	Micropolluants dont les concentrations sont différentes entre les 3 bassins versants
Métaux	Cd, Mo, Pb, Ti, V	As, Cu, Cr, Ni, Sr, Zn
Micropolluants organiques	bisphénol A, alkylphénols	HAP, PBDE
Pesticides	glyphosate, glufosinate, AMPA, mécoprop, isoproturon	diuron, carbendazime (différences pas statistiquement testées)

Tableau 9 : Résultats du projet INOGEV (*Gasperi et al., 2013*).

D'autres micropolluants en revanche sont présents à des concentrations significativement différentes entre les bassins (Tableau 9).

- Les concentrations les plus importantes en Cu, Zn, Sr, Ti et HAP, reconnus comme étant des traceurs du trafic automobile, ont été mesurées dans le bassin qui connaît le trafic le plus dense (bassin de Sucy).
- Les concentrations les plus importantes en Cr et Ni ont été mesurées dans les eaux pluviales de Chassieu et pourraient donc tracer la contamination liée aux activités industrielles locales.
- Si les données sur les pesticides sont trop peu nombreuses pour être testées statistiquement, les eaux de Chassieu présentent les concentrations les plus faibles en diuron et carbendazime qui entrent dans la composition des peintures antialissure. Ceci paraît cohérent avec la forte proportion de façades métalliques dans ce bassin qui elles, ne sont pas traitées avec ces peintures.
- Les concentrations en PBDE sont variables entre les bassins sans que les causes soient clairement identifiées.

11. Projet INOGEV : Innovations pour la Gestion durable de l'Eau en Ville (2010-2013). Projet ANR Villes durables 2009.

12. Les 77 substances étudiées (*Gasperi et al., 2013*) : métaux (x14), pesticides (x30), HAP (x16), PBDE (x9), le bisphénol A, alkylphénols (x7).

Quelle est la contribution des différentes sources et voies de transfert aux flux de micropolluants ?

Essentiel

La contribution des différentes sources et des voies de transfert est très variable en fonction des micropolluants considérés. Dans un objectif de réduction des micropolluants il est indispensable de quantifier ces contributions relatives afin de cibler les actions à mener. On utilise non plus les concentrations seules mais on calcule des flux de micropolluants (concentrations multipliées par un débit d'eau). Les différentes études qui s'intéressent aux flux de micropolluants portent sur des substances spécifiquement sélectionnées pour être représentatives des sources et des échelles spatiales considérées. En région parisienne, les alkylphénols et les phtalates mesurés dans les eaux usées proviennent à 95 % des rejets domestiques et seulement à 5 % des effluents industriels. Les flux de produits pharmaceutiques provenant des rejets hospitaliers sont minoritaires devant les rejets domestiques du site pilote de Bellecombe (SIPIBEL). Les apports atmosphériques représentent en général moins de 30 % de la contamination des eaux de ruissellement en tête de bassin pour la plupart des micropolluants. Cependant, les retombées atmosphériques peuvent contribuer à 100 % aux flux de PCB. Dans les eaux unitaires de temps de pluie, le réseau lui-même peut représenter jusqu'à 80 % des flux de micropolluants présents sous forme particulaire. Ceci s'explique par des mécanismes de dépôts en temps sec puis de remise en suspension en temps de pluie. Selon le micropolluant considéré, la contribution de l'agglomération parisienne aux flux véhiculés en Seine est variable. Ainsi, les rejets urbains contribuent à moins de 20 % des flux de bisphénol A, HAP et alkylphénols, à 40 % des flux de PCB et DEHP (phtalates) et à 80 % pour les PBDE qui circulent en Seine à l'aval de Paris.

Les travaux d'Urbis menés ces dernières années se sont intéressés aux flux de polluants à différentes échelles (Figure 7). Aussi, certains portent sur la contribution :

- des différentes sources de micropolluants dans la composition des eaux urbaines (eaux pluviales, eaux usées...),
- des différentes eaux urbaines dans la ville,
- de la ville à la contamination du milieu.

La contribution des sources urbaines

Dans le milieu urbain, les sources de micropolluants sont nombreuses (voir page 30) mais à l'échelle de la ville, ils sont tous véhiculés par les eaux usées ou les eaux pluviales. La caractérisation et la quantification des contributions relatives des différentes sources et voies de transfert de ces effluents est une première étape nécessaire dans l'objectif d'une réduction des flux de micropolluants.

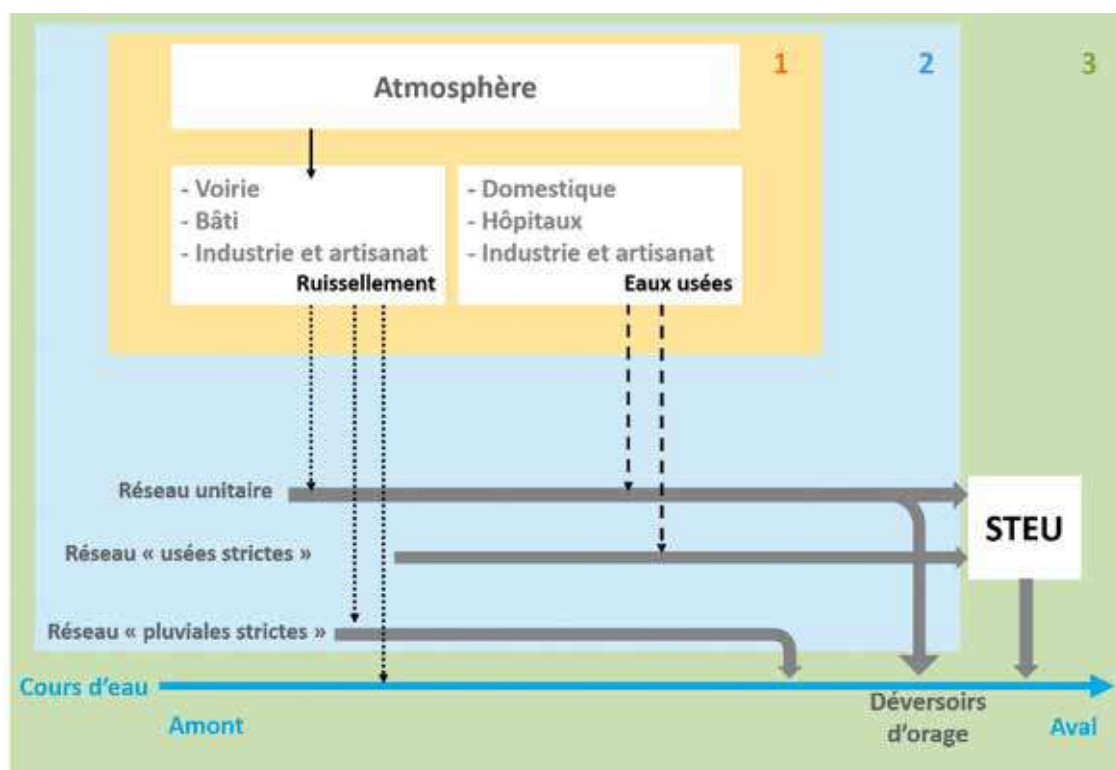


Figure 7 : Réseau d'assainissement et échelles d'études d'Urbis 1) contribution des différentes sources urbaines, 2) contribution des eaux urbaines, 3) contribution de la ville au milieu (traits pleins : pluie, pointillés : eaux de ruissellement, tirets : eaux usées, STEU : station d'épuration des eaux usées).

AU SEIN DES EAUX USÉES

Les eaux usées sont composées des effluents domestiques mais aussi des effluents industriels, pour la plupart déjà prétraités avant leur rejet en réseau, des effluents artisanaux et hospitaliers. Leurs contributions respectives varient en fonction des micropolluants considérés et de l'importance de ces sources sur le bassin.

Les travaux menés au sein des observatoires d'Urbis apportent des éléments de réponse sur ces contributions, grâce à des approches de calculs de flux (concentrations multipliées par des débits) de micropolluants spécifiquement sélectionnés pour être représentatifs des sources et du contexte de l'étude.

Flux unitaires par équivalent-habitant

A partir des concentrations mesurées dans les eaux usées brutes, il est possible d'exprimer des flux de micropolluants par équivalent-habitant (Figure 8). Le calcul a été fait ici à partir des concentrations de plusieurs micropolluants organiques mesurées en entrée des stations d'épuration des eaux usées

(STEU) du bassin parisien (zone SIAAP). Ces concentrations sont divisées par la concentration moyenne d'azote total Kjeldahl (NTK) en entrée des STEU parisiennes (55 mgNTK/L en moyenne) et en considérant une valeur de 15 gNTK/j/hab.

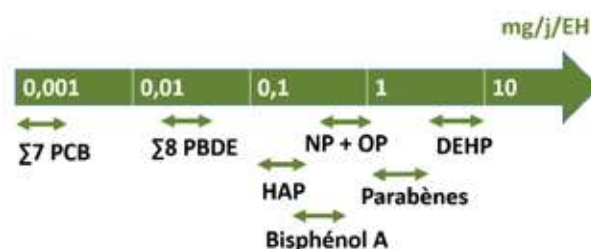


Figure 8 : Ordre de grandeur des flux unitaires de micropolluants organiques par jour et par équivalent habitant (EH) calculés sur l'année 2014 pour l'agglomération parisienne, NP : nonylphénols, OP : octylphénol.

QUELQUES RÉSULTATS

ALKYLPHÉNOLS ET PHTALATES : CONTRIBUTIONS RELATIVES DES EFFLUENTS INDUSTRIELS ET DOMESTIQUES (BERGÉ, 2012)

Les flux d'alkylphénols et de phtalates (micropolluants entrant dans la composition d'un grand nombre de produits industriels et domestiques) des eaux usées domestiques ont été comparés à ceux des rejets industriels de onze secteurs d'activités (représentant plus de 90 % des volumes d'effluents industriels de l'agglomération parisienne). Il s'avère que pour le bassin parisien, les niveaux de concentrations pour ces micropolluants sont globalement les mêmes entre les deux types d'effluents. **Cependant, compte tenu des volumes produits, les effluents industriels ne contribuent qu'à moins de 5 % des flux annuels d'alkylphénols et de phtalates véhiculés dans les eaux usées du bassin parisien.**

Attention : les mesures réalisées sur les effluents industriels correspondent aux concentrations après prétraitement. L'ensemble de ces résultats est valable pour le bassin parisien qui est faiblement industrialisé et fortement urbanisé. La contribution des effluents industriels est maximisée car certains effluents considérés dans cette étude pourraient aussi être rattachés à des activités domestiques (eaux de nettoyage de vêtements et sanitaires des universités).

PRODUITS D'ENTRETIEN ET COSMÉTIQUES : CONTRIBUTIONS RELATIVES DES EAUX GRISES ET EAUX VANNES (DESHAYES, 2015 ET ZEDEK, 2016)

Au sein des effluents domestiques, on peut distinguer les eaux vannes et les eaux grises. La contribution respective de ces deux types d'eau a été calculée pour un groupe de micropolluants organiques entrant

dans la composition d'un grand nombre de produits d'entretien et cosmétiques. Il s'agit des alkylphénols, phtalates, parabènes, triclosan et triclocarban. Il apparaît que pour ces micropolluants, les eaux grises contribuent à plus de 90 % des flux mesurés dans les eaux domestiques totales. Parmi les différentes composantes des eaux grises, les eaux de douche et les eaux de lave-linge s'avèrent être les sources majoritaires (> 80 %) des micropolluants étudiés avec, pour les parabènes, triclosan et triclocarban, une troisième source importante que sont les eaux de lave-vaisselle (voir page 30).

RÉSIDUS DE MÉDICAMENTS ET DE DÉTERGENTS : CONTRIBUTIONS RELATIVES DES EFFLUENTS HOSPITALIERS ET DOMESTIQUES (LECOMTE, 2016)

En Haute-Savoie, une étude visant à définir la meilleure stratégie de gestion des effluents hospitaliers s'est attachée à caractériser les concentrations et les flux d'une quinzaine de résidus pharmaceutiques dans les effluents hospitaliers et les rejets domestiques (Figure 9). Les résultats ont montré que les effluents hospitaliers sont caractérisés par des concentrations plus élevées en résidus médicamenteux que les eaux domestiques. Cependant, de par les volumes produits, il s'avère que les flux de résidus de médicaments et de détergents proviennent très majoritairement ($\approx 70\%$) des apports domestiques diffus sauf pour deux antibiotiques utilisés uniquement en milieu hospitalier : la ciprofloxacine et la vancomycine (Figure 9). Ces résultats sont cohérents avec ceux acquis dans le cadre de programmes européens (Pills, 2008-2012 et No Pills, 2015¹³) qui avaient démontré que pour une agglomération possédant un centre hospitalier, seulement 20 % du flux de résidus de médicaments rejetés au réseau étaient issus des établissements de soin.

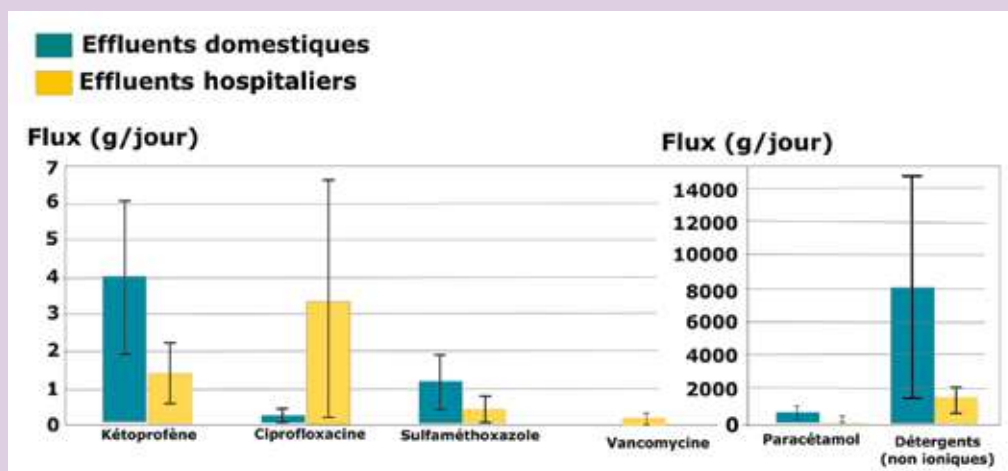


Figure 9 : Flux en g/j apportés par les effluents urbains et hospitaliers, de molécules dont les concentrations sont supérieures dans l'effluent hospitalier (de février 2012 à octobre 2014, Lecomte (coord.), 2016).

13. Programmes européens regroupant des partenaires allemands, français, luxembourgeois, hollandais et anglais sur les résidus pharmaceutiques dans l'environnement et en particulier dans l'eau.

AU SEIN DES EAUX PLUVIALES

La contamination des eaux pluviales est apportée à la fois par les retombées atmosphériques (dont la contamination peut provenir de sites plus ou moins éloignés¹⁴), et le lessivage des contaminants présents sur les différentes surfaces urbaines (micropolluants entrant dans la composition des surfaces ou déposés par les différentes activités et pratiques d'entretien au sein du bassin, voir page 30). Dans le cadre d'une gestion à la source des eaux de ruissellement, plusieurs études se sont intéressées à caractériser et quantifier la contribution de ces différents types d'apports aux flux de polluants véhiculés dans les eaux de ruissellement.

Flux unitaires par hectare actif en aval de bassin

Des flux unitaires de micropolluants dans les eaux pluviales ont pu être calculés par hectare actif et par millimètre de pluie à partir des concentrations en micropolluants mesurées dans les eaux pluviales de trois bassins français (Nantes, Lyon et Paris) et des mesures de pluviométrie (Figure 10, Hannouche et al., 2017).

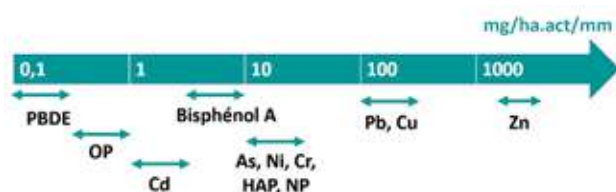


Figure 10 : Flux unitaires de micropolluants dans les eaux pluviales par hectare actif et par millimètre de pluie calculés pour trois bassins versants français (Chassieu, Pin Sec, Sucy, Hannouche et al., 2017). NP : nonylphénols, OP : octylphénol.

Contributions relatives des apports atmosphériques et des surfaces

Au sein des eaux de ruissellement, les contributions relatives de l'atmosphère et des surfaces urbaines ont été calculées pour une vingtaine de micropolluants (Zgheib, 2009 ; Bressy, 2010 ; Gasperi et al., 2013). Malgré une certaine variabilité interbassins et entre substances, les contributions atmosphériques sont généralement inférieures à 30 % pour une grande partie des substances prioritaires étudiées. Les 70 % restants témoignent d'une production locale par les surfaces et activités au sein du bassin (trafic, matériaux, sites industriels, Figure 11). Néanmoins, pour certains pesticides (atrazine, simazine), une contribution plus importante des eaux météoriques peut être observée. L'exception concerne les PCB, pour lesquels l'origine atmosphérique peut représenter jusqu'à 100 % des apports.

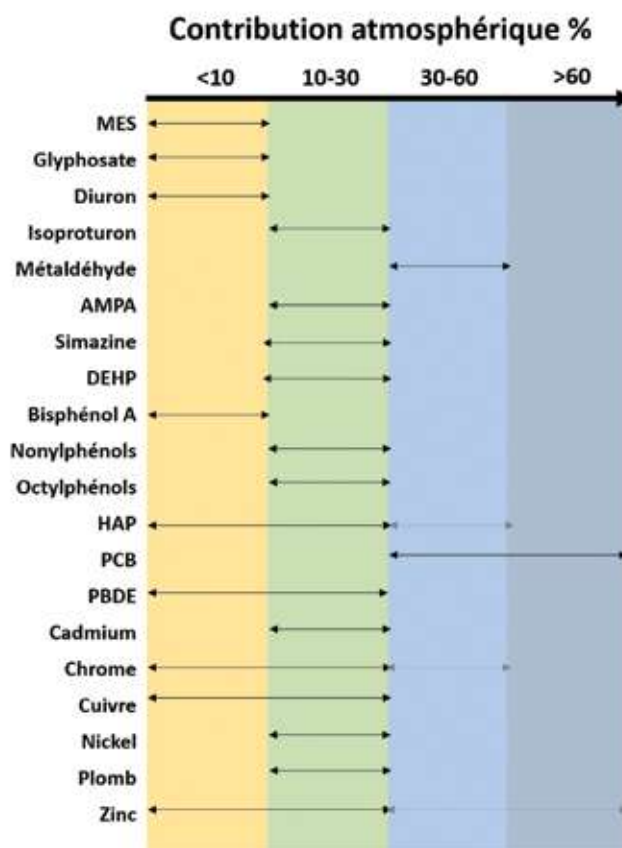


Figure 11 : Synthèse des contributions des retombées atmosphériques aux flux de MES et micropolluants dans les eaux de ruissellement de plusieurs bassins français (Zgheib, 2009 ; Bressy, 2010 et Gasperi et al., 2013).



14. A titre d'exemple, sur le site de Chassieu suivi par l'OTHU, des pesticides à usage agricole (isoproturon) ont été observés dans les eaux pluviales, avec des pics liés aux périodes d'application sur les cultures (d'octobre à janvier). Ces flux de pesticides proviennent de zones agricoles voisines, situées à quelques kilomètres, et sont transportés par voie atmosphériques (Becouze-Lareure et al., 2015).

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

CONTRIBUTIONS DES SOURCES URBAINES À L'ÉCHELLE DU QUARTIER RÉSIDENTIEL DENSE (BRESSY, 2010)

Dans un quartier résidentiel dense de la banlieue parisienne (93), la contribution des différentes sources (voirie, bâti, retombées atmosphériques) a été quantifiée pour plusieurs micropolluants (Figure 12).

Dans ce bassin caractérisé par une faible circulation, le bâti et le trafic contribuent à part égale (~40 %) à l'introduction des HAP et des nonylphénols dans les eaux de ruissellement.

Pour le cuivre, le trafic automobile contribue à 62 % (plaquettes de freins...) tandis que le bâti contribue à plus de 80 % aux flux de zinc du quartier.

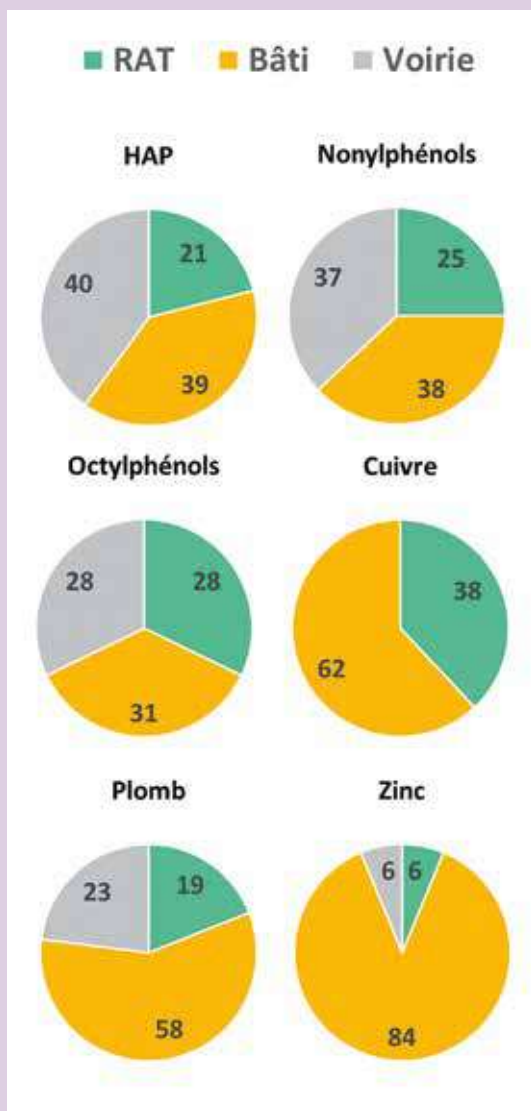


Figure 12 : Contributions (%) des retombées atmosphériques totales (RAT), des surfaces bâties et des voiries à la contamination des eaux de ruissellement à l'échelle d'un quartier résidentiel dense (Bressy, 2010).

Contribution des eaux urbaines dans la ville

Dans la ville, les différentes matrices sont les eaux usées et les eaux pluviales. Néanmoins, dans le cas des réseaux unitaires, un troisième type d'eau existe, ce sont les eaux unitaires de temps de pluie dont une partie est envoyée dans les STEU et l'autre est rejetée directement vers le milieu récepteur via les déversoirs d'orage.

La contribution respective de ces différentes eaux urbaines aux flux totaux de micropolluants rejetés par la ville a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et montrent des résultats contrastés en fonction des micropolluants considérés.

CONTRIBUTION DU RÉSEAU À LA CONTAMINATION DES EAUX UNITAIRES DE TEMPS DE PLUIE

Au sein du réseau d'assainissement, le réseau lui-même peut être considéré comme un réacteur au sein duquel ont lieu des mécanismes de dépôts des micropolluants particulaires en temps sec puis de remise en suspension de ces dépôts par temps de pluie (Figure 13). Ce constat ne vaut pas seulement pour le réseau parisien qui présente des faibles pentes puisque ces mécanismes sont également observés dans le bassin d'Ecully à Lyon dont la pente est supérieure.

Ainsi, pour les micropolluants organiques hydrophobes et certains métaux (préférentiellement adsorbés ou complexés aux particules) comme le cuivre et le plomb, les eaux unitaires de temps de pluie apparaissent davantage contaminées que les eaux de ruissellement et les eaux usées.

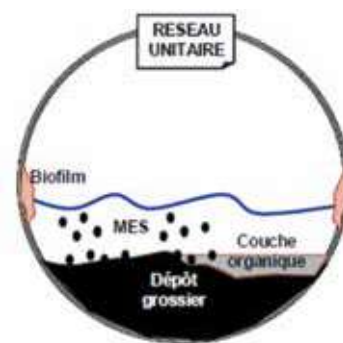


Figure 13 : Différents types de dépôts en réseau d'assainissement unitaire (Moilleron, 2004).

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

Un bilan de masse réalisé en entrée et en sortie du réseau parisien indique qu'entre 20 et 80 % de la masse de matières en suspension observée à l'exutoire d'un réseau par temps de pluie provient de l'érosion des dépôts du réseau. Pour les HAP, le réseau peut contribuer de 40 à 70 % aux concentrations totales mesurées dans les eaux unitaires de temps de pluie (Gasperi et al., 2012).

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

FLUX TRANSITANT DANS LES RÉSEAUX

Une base de donnée a été constituée à partir de l'ensemble des concentrations disponibles (toutes études confondues sur le bassin parisien) pour cinq substances (ou familles de substances) organiques (HAP, PCB, alkylphénols, phtalates, bisphénol A). L'objectif était de calculer les contributions des réseaux unitaires, séparatifs et des surverses unitaires de temps de pluie à l'échelle de la zone SIAAP (Briand *et al.*, 2016, Figure 14).

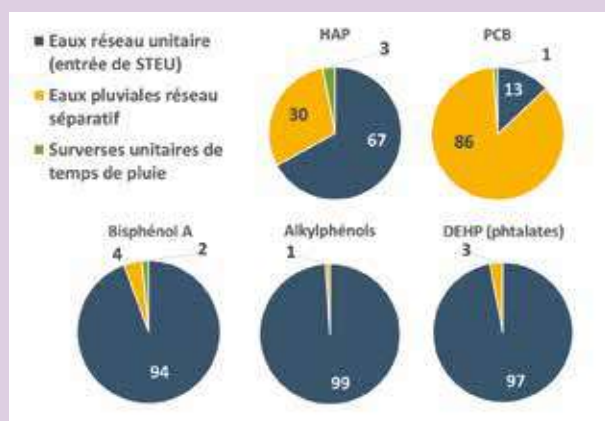


Figure 14 : Contribution relative des différentes eaux urbaines aux flux totaux annuels de micropolluants véhiculés dans les réseaux unitaire et séparatif de la zone SIAAP ($\Sigma 16$ HAP, DEHP, AP : alkylphénols et éthoxylés), $\Sigma 7$ PCB)¹⁵ (Briand *et al.*, 2016).

Sur la base de ces données, il s'avère que les flux de DEHP, d'alkylphénols et de bisphénol A sont en très grande majorité (à plus de 90 %) véhiculés par les eaux du réseau unitaire parisien (Figure 14). Pour les HAP, la contribution est mieux répartie entre les eaux unitaires (67 %) et les eaux pluviales strictes du réseau séparatif (30 %). En revanche, la grande majorité des PCB est véhiculée par les eaux pluviales strictes. De par les faibles volumes d'eau en jeu (Tableau 10), la contribution des surverses unitaires sont faibles (≤ 3 %).

Attention : ces résultats sont spécifiques à la zone SIAAP (agglomération parisienne) dont le réseau est principalement unitaire. Les valeurs utilisées pour les eaux unitaires correspondent aux concentrations mesurées en entrée de STEU par temps sec. Ces valeurs sont accompagnées d'importantes incertitudes (notamment dues aux variabilités spatiales et temporelles des concentrations dans les différents compartiments urbains).

Type de réseau	Paramètres	Valeurs (Mm ³ /an)
Unitaire	Volume collecté	911
	Volume traité en STEU	897 (dont ~800 en temps sec et ~100 en temps de pluie)
	Surverses unitaires de temps de pluie	14
Séparatif	Volume collecté en réseau pluvial strict	95

Tableau 10 : Caractéristiques de l'assainissement de l'agglomération parisienne gérée par le SIAAP (données 2015).

15. - Somme des 16 HAP : naphtalène, acénaphthylène, acénaphtène, fluorène, anthracène, phénanthrène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, dibenzo(ah)anthracène, benzo(k)fluoranthène, benzo(ghi)peryène, indénol(1,2,3-cd)pyrène.
 - Somme des 7 PCB : PCB-28, -52, -101, -138, 153, -180.
 - Somme des 8 PBDE : BDE-28, -47, -99, -100, -153, -154, -183, -209.
 - Somme des 4 alkylphénols : nonylphénols (4-NP), octylphénols (4-t-OP), nonylphénols mono- et di-éthoxylés (NP1EO et NP2EO).

Contribution de la ville au milieu

Les grands bassins présentent une certaine hétérogénéité dans l'occupation de leur sols (zones rurales, urbains denses,

etc.). Ainsi, selon les sources et les usages des différents micropolluants, la contribution des zones urbaines aux flux reçus par le milieu est variable.

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

COMPARAISON DES FLUX EN SEINE ET FLUX URBAINS

Les flux en Seine de six substances ou familles de substances (HAP, alkylphénols, bisphénol A, DEHP, PBDE, PCB) ont été calculés en amont et à l'aval de l'agglomération parisienne et comparés aux rejets urbains totaux (effluents traités de STEU, surverses unitaires de temps de pluie et rejets pluviaux strictes, Figure 15, Cladière, 2012 ; Briand et al., 2016). Pour l'ensemble des micropolluants étudiés ici on observe une augmentation des flux de l'amont vers l'aval du bassin parisien. Cependant, cette augmentation est davantage marquée pour les flux de bisphénol A (multiplié par un facteur 9) que pour ceux des HAP et de DEHP (facteur 5-6), et encore davantage que pour les PCB, alkylphénols et PBDE (facteur 3-4). La contribution de l'agglomération de Paris dans ces augmentations est également différente selon les substances. Ainsi, si pour le bisphénol A, les HAP et les alkylphénols, les rejets urbains totaux ne contribuent qu'à moins de 20 % aux flux en Seine calculés à l'aval, pour les PCB et le DEHP ils représentent environ 40 %. Les PBDE montrent une influence maximale de l'agglomération parisienne (80 %) mais il s'agit également de polluants dont les flux mesurés en Seine sont les plus faibles.

Attention : ces résultats sont spécifiques à l'agglomération parisienne. Les volumes utilisés pour les calculs sont donnés dans le Tableau 10. Ces valeurs sont également accompagnées d'importantes incertitudes notamment dues à la variabilité spatiale et temporelle des concentrations dans les différents compartiments urbains et environnementaux. Les flux en Seine sont calculés à partir de mesures en basses eaux, or, à l'instar des phénomènes d'érosion et de remise en suspension des dépôts dans les réseaux, des mécanismes d'érosion et de remobilisation des sédiments dans le lit mineur se produisent en période de hautes eaux. Les concentrations de certains micropolluants particuliers augmentent alors fortement et les contributions relatives des rejets urbains peuvent fortement varier.

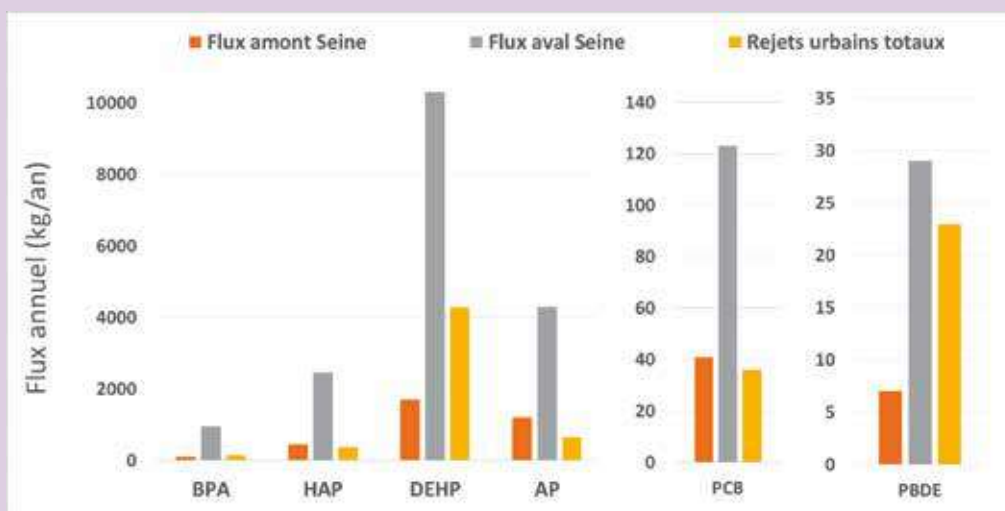
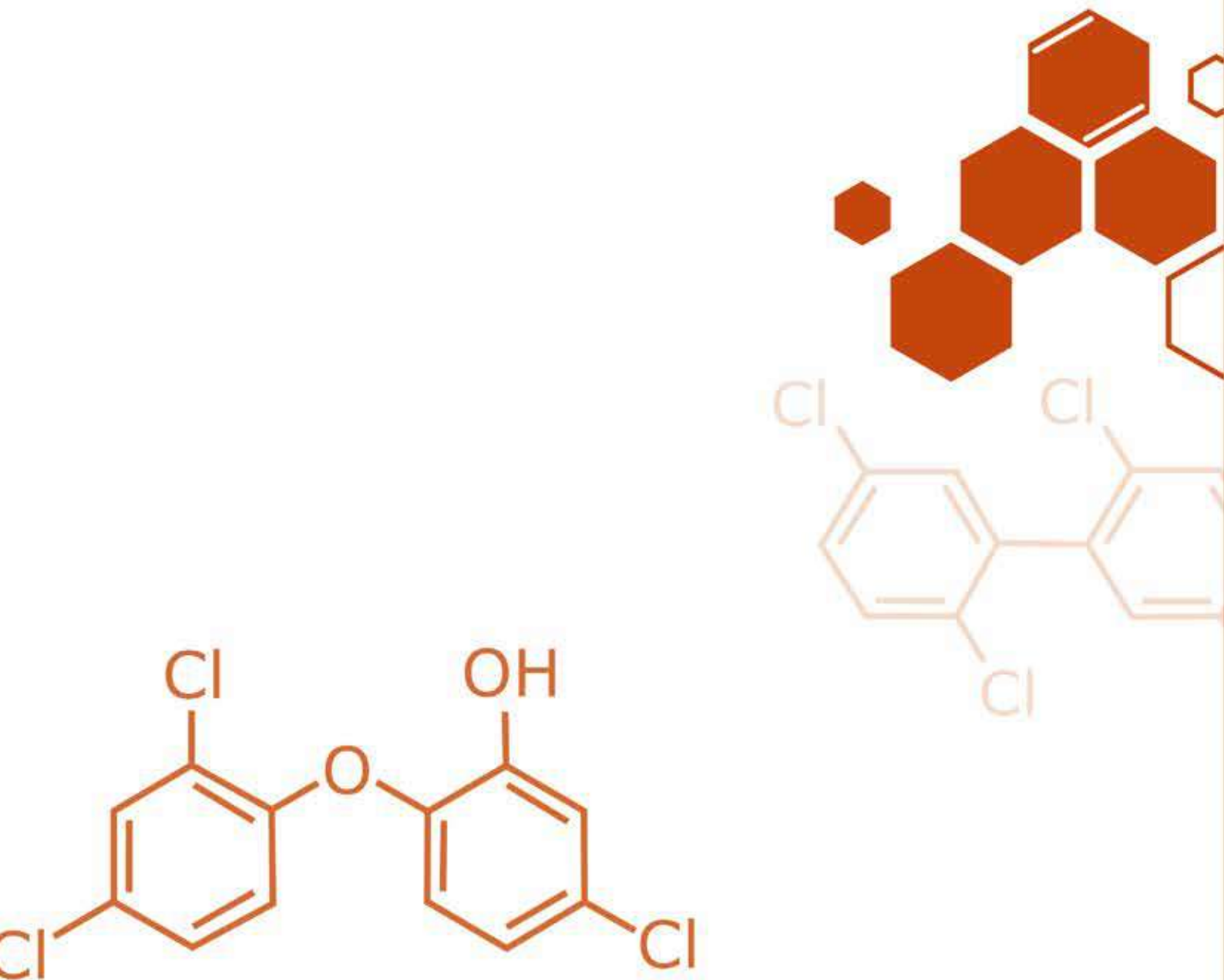
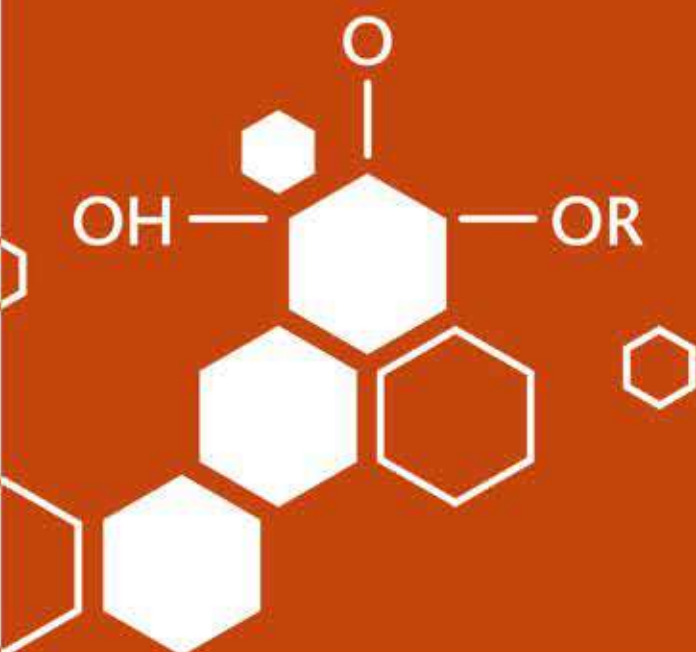


Figure 15 : Flux annuels (kg/an) des micropolluants, dans la Seine à l'amont de Paris (Marnay), à l'aval de Paris (Triel-sur-Seine) et dans les rejets totaux urbains de l'agglomération parisienne (somme des effluents traités de STEU, des effluents pluviaux stricts et des surverses unitaires de temps de pluie).

Qu'est-ce qui détermine le devenir des micropolluants dans l'environnement urbain ?



3



50

Quels sont les processus physico-chimiques et biologiques impliqués dans le devenir des micropolluants ?



Quels sont les processus physico-chimiques et biologiques impliqués dans le devenir des micropolluants ?

Essentiel

Les micropolluants regroupent une grande diversité de propriétés physico-chimiques (hydrophobicité, biodégradabilité...), y compris au sein d'une même famille de composés (les différents HAP sont plus ou moins « lourds », hydrophobes ou volatils). Ces caractéristiques expliquent en partie les différences d'intensité des processus physiques (filtration, advection), physico-chimiques (adsorption, décantation, photolyse, volatilisation...) et biologiques (biodégradation, bioaccumulation...) qui contrôlent le transport, la dégradation ou le piégeage des micropolluants dans les compartiments environnementaux et urbains. Le devenir d'une substance dans son environnement va également dépendre des paramètres du milieu (pH, température, teneur et nature des matières en suspension et de la matière organique dissoute...) qui modifient ou entrent en interaction avec les propriétés physico-chimiques intrinsèques des molécules. L'ensemble de ces facteurs détermine en particulier la répartition des micropolluants entre les formes dissoutes et particulaires. Ainsi, un même micropolluant pourra se trouver sous forme dissoute dans une eau pluviale d'un bassin donné et sous forme particulaire dans un autre type de bassin. Cette répartition contrôle à la fois l'impact du micropolluant envers les organismes vivants et son devenir dans les différents ouvrages de gestion des eaux urbaines.

Les processus impliquant le devenir des micropolluants

En fonction de leurs utilisations et de leurs propriétés (dégradabilité, volatilité, solubilité...), ces molécules peuvent se disperser dans les différents compartiments de l'environnement. Dans l'eau, les micropolluants sont soumis à un grand nombre de processus physiques, chimiques ou biologiques qui ont lieu en solution, à l'interface eau/solide ou eau/atmosphère (Figure 16 et Tableau 11). **Ces processus vont déterminer la façon dont les micropolluants vont être transportés, piégés ou dégradés** à la fois dans le milieu naturel (cours d'eau, sols) mais aussi dans les milieux urbains (réseau, ouvrages de gestion). Afin de prédire correctement le devenir des micropolluants et de proposer des outils de modélisation, il est nécessaire de connaître l'importance relative de ces différents processus.

RÉPARTITION DISSOUS/PARTICULAIRE

Dans l'eau ou dans les sols, un micropolluant peut se trouver sous différentes formes chimiques, c'est ce qu'on appelle la spéciation. On fait souvent la distinction simple entre la fraction dissoute et la fraction particulaire. On place généralement la limite entre les deux à 0,45 µm. Au sein de la fraction dissoute, les micropolluants peuvent être sous forme libre ou bien complexée à la matière organique dissoute (MOD). Les micropolluants sous forme particulaire sont adsorbés sur la phase solide (organique ou minérale) qui peut être en suspension ou immobile (substrat de filtration, sédiments, sols...).

Enfin, on distingue une troisième fraction, la fraction colloïdale. Les colloïdes sont de très fines particules comprises entre 10⁻⁹ et 10⁻⁵ m. Les micropolluants qui s'adsorbent sur des colloïdes de taille supérieure à 0,45 µm sont classés dans la fraction particulaire. Ceux, en revanche, adsorbés sur des particules inférieures à 0,45 µm, sont classés dans la fraction dissoute (Figure 16).

Cette répartition entre les phases dissoute et particulaire est de première importance car elle contrôle en grande partie l'exposition des organismes vivants aux différentes substances.

En effet, la fraction biodisponible correspond globalement à la fraction dissoute. Pour les métaux, elle correspond à la fraction dissoute et libre (non complexée).

Cette répartition détermine aussi l'efficacité épuratoire des ouvrages de gestion des eaux urbaines (voir pages 58 et 62).

PROCESSUS DE TRANSFERT/RÉTENTION

Le devenir des substances dissoutes est contrôlé par les processus hydrodynamiques comme l'advection (entraînement par le mouvement de l'eau) et l'infiltration au travers d'un substrat. Lorsque la taille des particules est supérieure à celles des pores du substrat (sols, sédiments), les micropolluants adsorbés sont piégés par **filtration**. Les micropolluants sont également soumis à des processus physico-chimiques comme l'**adsorption** sur les surfaces solides, qui selon le courant et la taille des particules, sont transportées par advection ou piégées par sédimentation ou adsorption sur le substrat.

Enfin, certains micropolluants sont sensibles aux processus biologiques comme la **bioaccumulation** dans les tissus des organismes incapables de les métaboliser ou de les évacuer.

PROCESSUS DISSIPATIFS

Plusieurs processus conduisent à la diminution de la concentration d'un micropolluant dans un compartiment donné. Ils s'appliquent surtout aux micropolluants organiques et sous forme dissoute (Tableau 11). Il s'agit de :

- la **volatilisation** au contact de l'air qui transfère les micropolluants de l'eau vers l'atmosphère,
- l'**hydrolyse** (décomposition chimique d'une substance par l'action directe ou indirecte de l'eau, de façon à ce qu'il apparaisse de nouvelles molécules) et la **photolyse** (destruction des liaisons chimiques par les rayons solaires) pour les micropolluants organiques et les complexes métalliques (ex : métal-substances humiques),
- la **biodégradation** sous l'action des microorganismes présents dans l'eau et dans les sols (pour les micropolluants organiques uniquement).

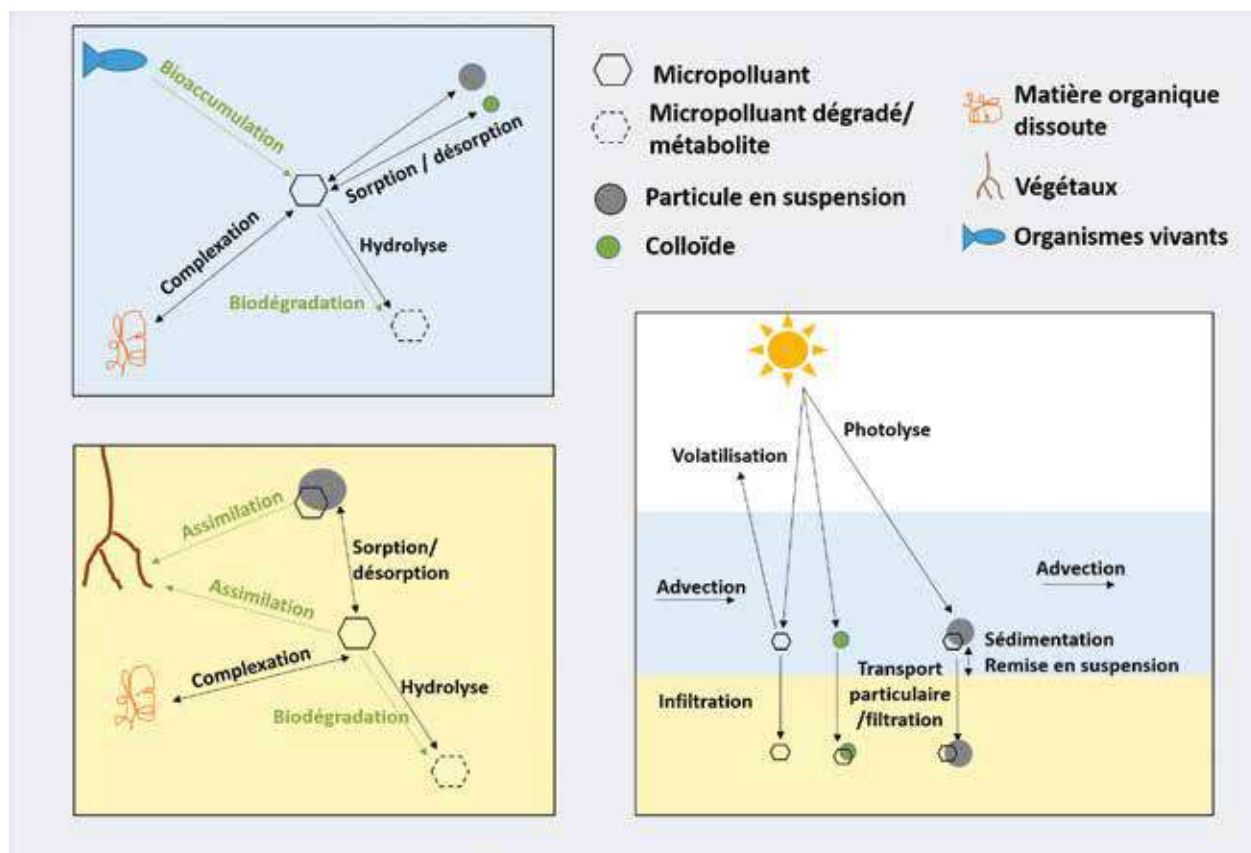


Figure 16 : Processus physico-chimiques (en noir) et biologiques (en vert) ayant lieu dans le compartiment eau (en bleu : milieux aquatiques, ouvrages de traitement), sol (en jaune : sédiments, filtres) et aux interfaces atmosphère/eau, eau/sol.

Les processus de dégradation d'un micropolluant ne conduisent pas toujours à la disparition de la substance mais peuvent former des produits de dégradation ou des métabolites ayant des propriétés physico-chimiques différentes du composé parent.

Remarque : dans la suite de cette question, nous nous intéressons particulièrement aux processus liés à la dépollution des eaux : adsorption, filtration, décantation, biodégradation et volatilisation qui entrent dans les procédés d'épuration des eaux urbaines.

Processus	Type polluant	Fraction
Advection	Tous	D+P
Adsorption	Tous	D
Assimilation (absorption)	Tous	D
Bioaccumulation	Tous	D+P
Biodégradation	Organiques	D+P
Filtration	Tous	P
Infiltration	Tous	D
Hydrolyse	Organiques	D
Photolyse	Organiques	D+P
Sédimentation	Tous	P
Volatilisation	Organiques + mercure	D

Tableau 11 : Processus affectant les micropolluants organiques ou métalliques dans les fractions dissoute (D) et particulaire (P) associées.

Qu'est ce qui contrôle ces processus ?

Si ces processus se déroulent la plupart du temps dans les différents milieux (naturels ou urbains), **leur occurrence et leur intensité dépendent à la fois des propriétés physico-chimiques des micropolluants et des conditions du milieu dans lequel ils se trouvent.**

LES PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES DES SUBSTANCES

Les micropolluants possèdent une très grande diversité de propriétés physico-chimiques.

- La **taille** de la molécule (poids moléculaire) va avoir un impact sur l'adsorption (selon la taille des sites d'adsorption du substrat) mais aussi sur la biodégradation (petites molécules plus facilement biodégradées).

Exemple : du fait de leur poids moléculaire élevé, l'adsorption de produits de contraste iodés tels que l'iomeprol ou l'iopamidol sur le charbon actif est plus faible que celle d'autres produits pharmaceutiques (plus légers).

- Plus une molécule est **complexe** (aromaticité, géométrie) plus elle est difficile à dégrader.

- La présence de **groupements chargés** influence également les phénomènes d'adsorption par des interactions électrostatiques.

Exemple : les molécules chargées positivement sont mieux éliminées par adsorption sur le charbon actif qui est globalement chargé négativement.

- La **solubilité** d'un micropolluant, exprimée en mg/L, représente sa capacité à se dissoudre dans une substance (ex : l'eau) ou au contraire à précipiter (Tableau 12). Elle contrôle en partie la répartition dissous/particulaire des micropolluants. Elle influence donc indirectement la biodégradation et la volatilisation qui affectent la fraction dissoute des micropolluants.

Exemple : les fluoroquinolones sont moins solubles et plus stables que les sulfamides. Dans le milieu naturel, les premières sont progressivement piégées dans les sédiments tandis que les secondes sont plus facilement biodégradées.

- L'**hydrophobicité** est un paramètre crucial puisqu'elle représente la tendance d'un micropolluant organique à s'adsorber ou au contraire à rester en phase dissoute. Elle est classiquement traduite par le coefficient de partage octanol/eau (K_{ow}). **Il existe une relation proportionnelle négative entre la solubilité et l'hydrophobicité.** Néanmoins, il convient de noter, que certaines substances hydrophiles ($\log K_{ow} < 4$) peuvent également se sorber sur les particules (ou sur les boues) sous l'effet d'interactions électrostatiques avec certains groupement chargés (ex. groupements hydroxyles) présents à la surface des particules. Comme la solubilité, l'hydrophobicité influence la biodégradation et la volatilisation des polluants.

Exemples de molécules hydrophiles et hydrophobes :

- les HAP, surtout les plus lourds (plus de quatre cycles aromatiques) sont très hydrophobes ($\log K_{ow} > 4$) et ont tendance à s'adsorber sur les surfaces minérales. Ils s'accumulent par exemple à l'interface eau/sédiment des bassins d'infiltration des eaux pluviales,
- à l'inverse la simazine qui est un pesticide plutôt hydrophile percole au travers des sols et se retrouve dans les nappes,
- au cours du traitement biologique dans les STEU, le DEHP, très hydrophobe ($\log K_{ow} = 7,6$), est principalement éliminé par sorption sur les boues activées même s'il subit également une légère biodégradation. Au contraire le bisphénol A, beaucoup moins hydrophobe ($\log K_{ow} = 3,3$) est principalement abattu par biodégradation.

- La **biodégradabilité** d'un micropolluant n'est pas réellement une propriété intrinsèque mais la résultante des propriétés citées ci-dessus.

Exemples :

- malgré une forte émission du bisphénol A dans les zones urbaines, les concentrations dans les sols sont faibles du fait de sa forte biodégradabilité,

- le NP1EC (alkylphénol carboxylé) est un produit de dégradation des alkylphénols éthoxylés (NPnEO), il est produit au cours des traitements biologiques et est donc présent à des concentrations importantes dans les rejets de STEU.

- A l'inverse, la **persistance** d'une molécule traduit sa capacité à rester dans le milieu sans être dégradée. Cette persistance est quantifiable par son temps de demi-vie (dans l'atmosphère, l'eau ou les sols). Mesurée en conditions contrôlées, le temps de demi-vie renseigne sur le processus étudié. Mesuré *in situ* il correspond à la résultante de tous les processus ayant lieu dans le milieu (Tableau 12).

Exemples :

- le temps de demi-vie des HAP est compris entre deux et neuf ans dans les sols pollués,

- les nonylphénols ont un temps de demi-vie dans l'eau de l'ordre de 150 jours.

- La **volatilité**, traduit la tendance d'un micropolluant dissous à se partager entre les phases gazeuse et liquide. Elle est déterminée par la constante de Henry K_H . Plus celle-ci est élevée, plus le composé est volatil (Tableau 12). La volatilisation n'affecte que les micropolluants dissous (Tableau 11), ainsi elle peut représenter un processus majeur dans l'élimination en STEU des molécules hydrophiles ($\log K_{OW} < 4$).

Dans un milieu donné, plusieurs processus coexistent. De la même façon, les micropolluants sont caractérisés par un ensemble de propriétés. Ainsi, le chemin que peuvent suivre deux molécules hydrophiles sera très différent si l'une est très volatile et l'autre très biodégradable (Figure 17).

Exemples :

- les substances volatiles comme le toluène, le benzène et autres composés organiques volatils (COV) sont abattus à plus de 70 % dans les traitements biologiques des STEU grâce aux conditions d'aération par stripage,

- dans le traitement des boues, pour les HAP les plus légers, la perte par volatilisation peut atteindre 25 % des pertes totales.

Processus	Paramètres	Unités	Seuils d'intensités		
			Faible	Moyen	Fort
Volatilisation	K_H : constante de Henry	atm.m ³ /mol	<10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ -10 ⁻³	>10 ⁻³
Adsorption	K_{OC} : coefficient partage eau/carbone organique	L/g	<10 ²	10 ² -10 ⁵	>10 ⁵
Solubilisation	Solubilité	mg/L	<10 ²	10 ² -10 ⁵	>10 ⁵
Bioaccumulation	$\log K_{OW}$: coefficient de partage octanol/eau	adimensionnel	<2	2-6	>6
Biodégradation	$T_{1/2}$: Temps de demi-vie	j	>180	180-30	<30
Photolyse	$T_{1/2}$: Temps de demi-vie	h	>120	120-24	<24

Tableau 12 : Paramètres et valeurs seuils d'intensités obtenues par modélisation pour l'élimination des micropolluants dans l'eau proposés par le programme ScorePP (Scholes et al., 2008).

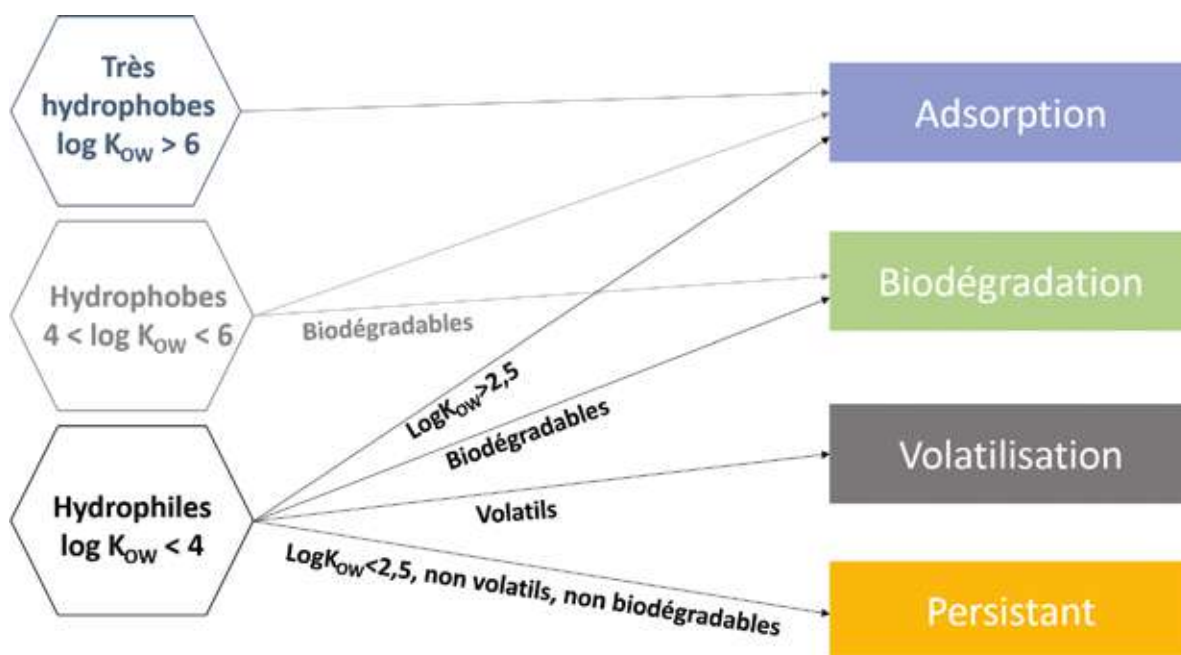


Figure 17 : Exemple de différents devenir de micropolluants en STEU en fonction des propriétés des molécules (modifiée d'après Mailler, 2015).

LES PROPRIÉTÉS DU MILIEU

Si les propriétés intrinsèques des molécules sont primordiales pour comprendre la sensibilité des micropolluants aux différents processus, l'intensité de ces processus est fortement dépendante des conditions du milieu (naturel ou artificiel).

- Le **pH** impacte la spéciation d'un micropolluant notamment en modifiant son hydrophobicité, sa solubilité ou la présence de groupements chargés. Il peut également impacter la diversité microbienne et par conséquent la biodégradation des micropolluants dans un milieu donné. Le pH modifie également la charge totale portée par un sol (ou toute phase solide) et peut alors inhiber ou favoriser l'adsorption des micropolluants (surtout les métaux).
- La **température** influence la solubilité (relation positive) des micropolluants et de ce fait, leur biodisponibilité. Ceci se traduit par des cinétiques de dégradation plus importantes. En revanche une température plus élevée réduit les capacités d'adsorption des micropolluants.
- La **composition de la matrice**, en particulier la nature des espèces dissoutes organiques et inorganiques, modifie l'affinité des micropolluants pour les phases dissoutes et particulaires. Certains éléments dissous inorganiques comme le calcium ou le magnésium peuvent favoriser le maintien des métaux en solution en entrant en compétition avec eux pour les processus de complexation.

- La **matière organique dissoute (MOD)** peut, en particulier, favoriser la rétention en phase dissoute des micropolluants ou au contraire favoriser leur adsorption sur les particules selon les propriétés des micropolluants et des particules.

Exemple : la MOD a plutôt tendance à garder les métaux et les HAP dans la fraction dissoute par complexation ou par compétition pour les sites d'adsorption sur les particules.

- Les **matières en suspension (MES)** et plus précisément, leur concentration, leur nature et leur granulométrie sont des facteurs extrêmement importants dans le devenir des micropolluants. En effet, en l'absence de MES, même les substances les plus hydrophobes resteront en phase dissoute. La taille des MES influence l'adsorption des micropolluants puisque les MES les plus grossières sont les moins réactives. Enfin, en fonction de la nature des matières en suspension (organiques, minérales), les micropolluants peuvent s'y adsorber ou non.

Exemple : les HAP s'adsorbent sur la partie organique des matières en suspension.

Parallèlement, les propriétés du substrat ont aussi leur importance.

- La **porosité** d'un milieu solide (sols, sédiments ou divers substrats utilisés dans les ouvrages de gestion des eaux) est déterminante pour la filtration des particules et des micropolluants en phase particulaire.

- La **proportion de matière organique et des argiles** dans les sols est déterminante pour l'adsorption des micropolluants.
- Les **conditions hydrodynamiques** (débits, champ de vitesses), les temps de séjour associés aux vitesses de chute des particules influencent le devenir des micropolluants particuliers : sédimentation, remise en suspension des particules et des polluants. Les temps de séjour de l'eau et les conditions tranquillisées influencent notamment les processus d'adsorption (temps de contact entre les micropolluants et les particules/substrats), de dégradation ou de volatilisation car ces processus ne sont pas instantanés. Ces paramètres hydrodynamiques sont d'ailleurs pris en compte dans la conception et le dimensionnement des ouvrages de dépollution des eaux.
- Les **conditions d'aération** ainsi que l'**ensoleillement** régulent respectivement les processus de volatilisation et de photolyse mais aussi de biodégradation.
- Enfin, la **présence d'organismes vivants** (microorganismes aérobies ou anaérobies, poissons, végétaux) contrôle l'intensité des processus de biodégradation, bioaccumulation et assimilation. Le Tableau 13 reprend les propriétés intrinsèques des micropolluants ainsi que les paramètres du milieu qui contrôlent l'intensité de tous ces processus. Il fournit également les indicateurs qui peuvent être utilisés pour les prédire et mesurer leur intensité en les comparant à des valeurs seuils.

Processus	Propriétés intrinsèques	Paramètres du milieu	Indicateurs
Adsorption	Hydrophobicité, taille des molécules	Teneur et nature des MES, de la MOD, pH	K_{OW} , K_{OC} , K_D
Volatilisation	Volatilité	Température, aération	K_H
Sédimentation	Hydrophobicité (polluants adsorbés)	Taille des particules, vitesse de courant, viscosité de l'eau	Vitesse de chute
Filtration	Hydrophobicité (polluants adsorbés)	Taille des particules, taille des pores du substrat	Porosité
Biodégradation	Biodégradabilité, structure chimique (aromaticité)	Présence de microorganismes, conditions oxygènes	$T_{1/2}$ vie
Hydrolyse	Structure chimique (aromaticité)	Présence d'eau	K_h
Photolyse	Structure chimique (aromaticité)	Ensoleillement	$T_{1/2}$ vie

Tableau 13 : Synthèse des propriétés physico-chimiques des micropolluants, des paramètres du milieu qui contrôlent les principaux processus de dépollution des eaux et des indicateurs associés (K_h : constante de dissociation, K_D : constante de sorption).

INFLUENCE DU TYPE DE MATRICE

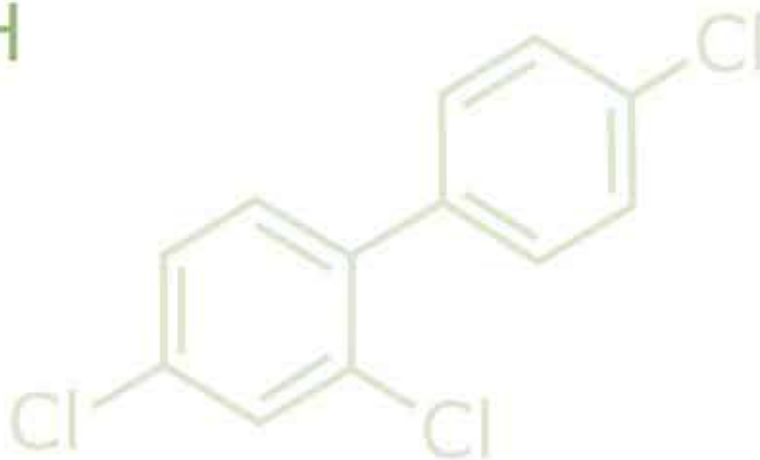
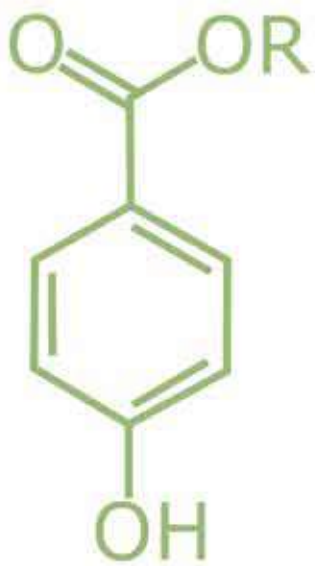
Les différentes eaux urbaines (eaux usées, eaux pluviales, eaux de ruissellement...) présentent des caractéristiques chimiques et physiques qui leur sont propres (pH, teneurs en MES et en matière organique...). **Par conséquent, un même polluant peut se retrouver préférentiellement sous forme dissoute ou sous forme particulaire en fonction du type de matrice considérée** (Tableau 14). C'est notamment le cas du cadmium, du cuivre, ou des alkylphénols. Au contraire, d'autres, comme les HAP, et particulièrement les composés possédant plus de quatre cycles aromatiques sont principalement présents sous forme particulaire dans tous les types d'eau. **Il a par ailleurs été montré que, dans les eaux de ruissellement en amont des réseaux, la fraction dissoute des polluants est globalement plus élevée que dans les eaux pluviales collectées à l'aval des réseaux** (voir pages 35 et 62). Enfin, selon les sources d'émissions, certains micropolluants peuvent être initialement émis sous forme particulaire comme c'est le cas du cuivre issu de l'usure des disques de freins tandis que dans les eaux de ruissellement de toiture, le cuivre est préférentiellement sous forme dissoute.

Matrice	Eaux de ruissellement			Eaux "aval de réseau"		
	Voirie	Toiture	Quartier	Eaux usées	Eaux pluviales	Eaux unitaires
Cd						
Cu						
Ni						
Zn						
Cr						
Al						
Fe						
Pb						
PCB						
HAP légers						
HAP lourds						
DEHP						
Alkylphénols						
Organoétains						
Pesticides						
Parabènes						

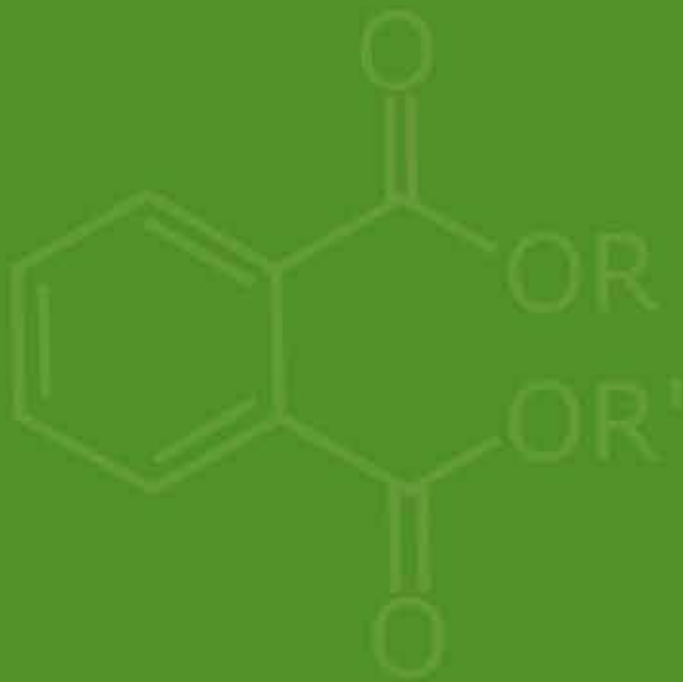
Dissous
 Variable
 Particulaire
 Non mesuré

Tableau 14 : Exemples de répartition dissous/particulaire de micropolluants observés dans les différents travaux d'Urbis (HAP légers < 4 cycles, HAP lourds ≥ 4 cycles).

Comment limiter le transfert de micropolluants vers le milieu ?



4

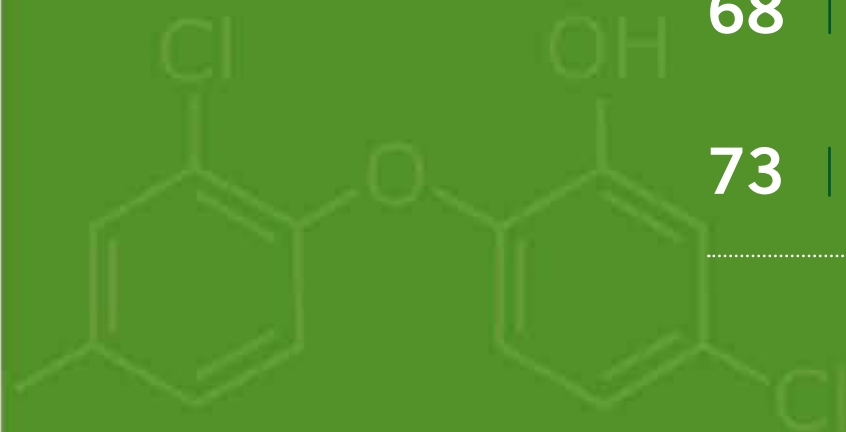


58 | Les stations de traitement des eaux usées (STEU) permettent-elles d'abattre les concentrations en micropolluants ?

62 | Comment gérer les micropolluants dans les eaux pluviales ?

68 | Quelle est la qualité des sous-produits de l'assainissement et les conséquences sur leur devenir ?

73 | Quelles alternatives à la gestion curative des micropolluants ?





Les stations de traitement des eaux usées (STEU) permettent-elles d'abattre les concentrations de micropolluants ?

Essentiel

Bien qu'elles ne soient pas conçues pour traiter ce type de polluants, les stations d'épuration permettent d'éliminer de façon plus ou moins importante une grande partie des micropolluants connus et recherchés dans les eaux usées. Les rendements d'épuration sont extrêmement variables d'un polluant à l'autre et dépendent de leurs propriétés physico-chimiques et des procédés mis en œuvre dans la station. Les micropolluants les plus hydrophobes, biodégradables et volatilisables, sont les plus sensibles aux processus d'épuration mis en œuvre dans les STEU et sont donc les mieux éliminés. Une amélioration notable du rendement est constatée lorsqu'une rétention des MES ou une nitrification biologique (voire une dénitrification) sont présentes. Les bilans épuratoires calculés à l'échelle de la filière de traitement montrent qu'une part des substances est transférée vers les boues d'épuration où certaines sont ensuite dégradées. Les micropolluants hydrophiles comme les pesticides et les médicaments sont peu éliminés par les traitements conventionnels. Les procédés de traitement tertiaire avancé (ozonation, ultraviolets et charbon actif), encore peu développés assurent une amélioration du rendement épuratoire supérieure à 70 % pour certaines substances.

Processus dans les STEU

Généralement, les stations de traitement des eaux usées (STEU), notamment dans les zones urbaines denses, comprennent un prétraitement, un traitement primaire et un traitement secondaire (ou biologique, Figure 18). Dans certaines stations, des traitements tertiaires sont mis en place. Les processus épuratoires mis en œuvre sont principalement la **décantation**, l'**adsorption sur les boues (ou sur un adsorbant)**, la **biodégradation** et la **volatilisation** (voir page 50). Les propriétés physico-chimiques des différents micropolluants vont donc conditionner leur élimination dans les STEU.

Performances globales

La comparaison des efficacités épuratoires des micropolluants d'une station à une autre est complexe du fait de la diversité des

filières et des traitements mis en place, ainsi que de la variabilité temporelle et interbassins des charges polluantes dans les eaux brutes (voir page 35).

En outre, lorsque les substances ne sont plus quantifiables en sortie de STEU, les modes de calculs des rendements peuvent également différer selon les études. Toutefois, les grandes tendances sont présentées ici en raisonnant à la fois à l'échelle de la filière et à l'échelle du traitement (primaire, secondaire et tertiaire).

Au sein d'une STEU, les rendements d'épuration sont extrêmement variables d'un polluant à l'autre (Tableau 15). Ils dépendent des propriétés physico-chimiques des composés et des processus mis en œuvre lors des différents traitements. Ainsi, les polluants les plus hydrophobes, adsorbés sur les MES ou sur les substrats (biofiltres, boues activées), les polluants biodégradables et volatilisables sont les plus sensibles et les mieux éliminés dans les STEU.

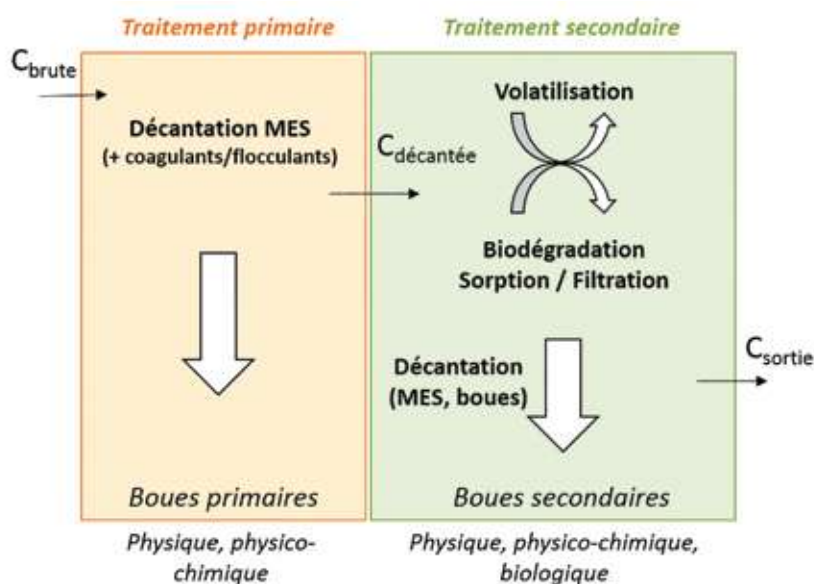


Figure 18 : Processus intervenant dans les différents traitements en STEU (filrière classique, modifiée d'après Scholes et al., 2008).

Efficacité variable selon la filière

La comparaison de différents types de filières a mis en évidence qu'à l'échelle de la station d'épuration, **l'élimination des micropolluants hydrophobes dépend de l'abattement des MES sur lesquelles ils sont adsorbés. Pour les autres, les rendements augmentent avec les niveaux de traitement des paramètres conventionnels.** En effet, les meilleurs rendements sont observés dans les stations permettant un traitement carbone + azote (nitrification et dénitrification).

À titre d'exemple, il a pu être calculé que pour 1 g d'azote total éliminé (classiquement utilisé comme indicateur des performances globales d'une STEU) on peut s'attendre à un abattement minimum de 0,5 µg de DEHP (phtalate), 0,02 µg de nonylphénol (alkylphénol), 0,07 µg de triclosan, 0,1 µg de methylparabène et 3,7 µg de zinc (Mailler, 2015).

ZOOM SUR LE TRAITEMENT PRIMAIRE

L'élimination des micropolluants lors du traitement primaire repose principalement sur la décantation des MES. Les micropolluants organiques les plus hydrophobes ($\log K_{ow} > 4$, voir page 50) sont éliminés à plus de 70 %. C'est le cas des HAP, DEHP, PBDE, PCB-28 et des métaux particuliers (Hg, Al, Ti, Cr, Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Ba, Pb).

Les micropolluants hydrophiles ($\log K_{ow} < 4$) comme les pesticides, les parabènes, les BTEX (benzènes, toluène, xylène), les composés organiques volatils (COV) et les substances pharmaceutiques sont peu ou pas éliminés lors de ce traitement.

La décantation physico-chimique lamellaire offre une performance supérieure d'environ 20 % comparée à une décantation classique. Cela s'explique, pour les micropolluants hydrophobes et les métaux, par un meilleur abattement des MES et de la fraction colloïdale par l'action des réactifs de coagulation/floculation.

ZOOM SUR LE TRAITEMENT SECONDAIRE BIOLOGIQUE

Les procédés de biofiltration et à boues activées permettent d'éliminer entre 20 et 80 % de l'ensemble des micropolluants étudiés, excepté pour les pesticides et certains médicaments. Cette variabilité s'explique par les différentes propriétés physico-chimiques des micropolluants. Là encore, on observe une très bonne élimination ($> 80 \%$) **des composés hydrophobes** ($\log K_{ow} > 4$) due à leur adsorption sur les substrats (biofiltres et boues activées) et à la décantation des MES restantes. **Les composés volatils** ($K_H > 10^{-4} \text{ atm.m}^{-3}/\text{mol}$) comme les COV et les BTEX **sont également bien éliminés ($> 70 \%$)** grâce aux dispositifs d'aération. Enfin, **la présence de microorganismes favorise l'élimination des micropolluants biodégradables en phase dissoute** tels que le DEHP et les alkylphénols. **L'efficacité de ces processus et surtout de la biodégradation augmente avec le temps de séjour.**

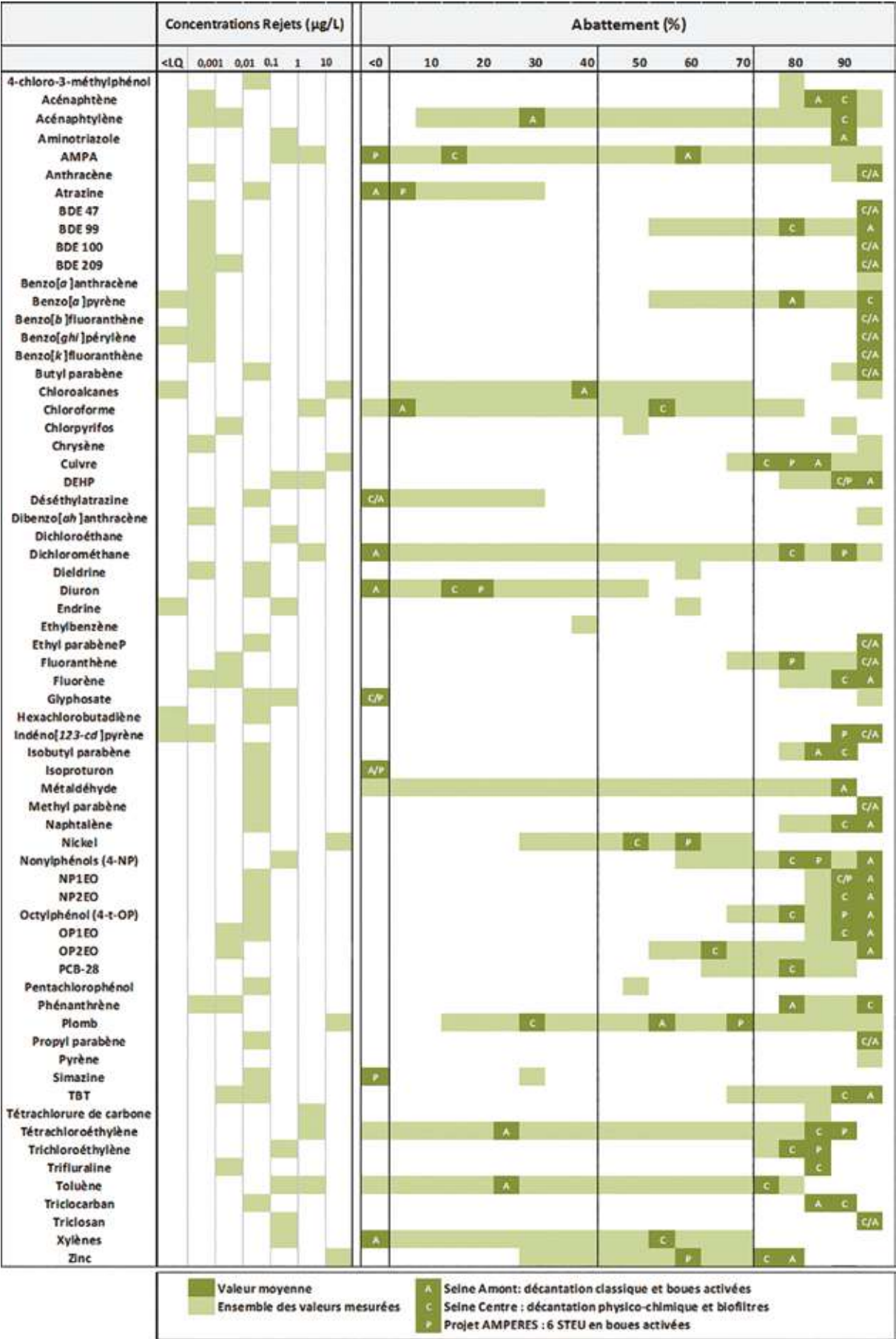


Tableau 15 : Concentrations dans les rejets de STEU et rendements d'élimination des micropolluants (données OPUR : STEU Seine Centre et Seine Amont (Mailler, 2015), données AMPERES, cinq STEU filière boues activées, Choubert et al., 2011).

Les STEU en zones rurales

Les travaux menés dans le cadre d'Urbis ou SIPIBEL¹⁶ sur les efficacités des STEU concernent principalement les zones urbaines denses. Cependant, des travaux parallèles (projet ANR AMPERES¹⁷) se sont intéressés aux stations des zones rurales de type filtre planté vertical ou, vertical + horizontal, lagune ou, lagune + filtre vertical, biodisques et lit bactérien. Il apparaît qu'en considérant des niveaux de traitement (carbone + azote) et des concentrations en MES similaires aux STEU des zones urbaines, **les STEU en zone rurale offrent des rendements similaires à celles des STEU urbaines.**

Concentrations dans les rejets

Sur une centaine de micropolluants étudiés dans le cadre des travaux d'OPUR comprenant les substances prioritaires de la liste DCE, des retardateurs de flamme, des surfactants, des pesticides et des produits pharmaceutiques, **la moitié seulement est encore quantifiable dans les eaux traitées. Les concentrations observées sont globalement inférieures à 0,1 µg/L (Mailler, 2015).** Néanmoins, certains micropolluants sont encore présents à des concentrations de l'ordre du µg/L. Cela s'explique soit :

- par des concentrations très élevées en entrée (ex : DEHP, métaux, chloroalcanes) ;
- par l'inefficacité des traitements conventionnels pour ces composés. C'est le cas de certains pesticides et résidus pharmaceutiques (ex : carbamazépine, ofloxacine, propranolol et sulfaméthoxazole).

Un transfert vers les boues

Les bilans de masse réalisés sur les filières eau et boues ainsi que les analyses de ces dernières montrent qu'une partie des micropolluants est transférée vers les boues. En effet, les polluants éliminés de la colonne d'eau par décantation et par sorption sur les substrats se retrouvent piégés en phase solide (voir page 68). Cela concerne principalement les polluants hydrophobes ($\log K_{ow} > 4$, alkylphénols, phtalates, organoétains, PBDE, HAP ou PCB) en phase particulaire, les métaux en phase solide (précipités, complexés, bioaccumulés) mais aussi certaines molécules hydrophiles ($\log K_{ow} < 4$) qui peuvent s'adsorber sur les boues de par leurs propriétés physico-chimiques (polarité, liaisons hydrogène, structure chimique).

Les traitements tertiaires

Au vu des concentrations élevées de certains micropolluants dans les eaux usées traitées et dans les boues de STEU, il apparaît que les traitements conventionnels primaires et secondaires sont insuffisants pour ces micropolluants. C'est pour cela que des techniques de traitements tertiaires, destinées à l'élimination des micropolluants résiduels ou réfractaires, sont développées depuis quelques années. Elles reposent sur des processus d'oxydation, d'adsorption ou sur leur combinaison. Il a été montré sur 53 micropolluants¹⁸ que l'efficacité épuratoire dépend de la dose (oxydant ou charbon) appliquée et que la combinaison des deux procédés ne permet pas d'augmenter significativement le nombre de substances bien ou très bien éliminées (projet ARMISTIQ¹⁹, Besnault et al., 2014). **L'ensemble des études menées sur le sujet montrent une élimination quasi nulle des métaux.**

QUELQUES RÉSULTATS

Dans le cadre du projet européen Triumph²⁰, des essais ont été menés sur un pilote d'ozonation (site SIPIBEL). Sur 32 molécules (médicaments, détergents, pesticides et hormones), 16 sont éliminées à plus de 80 %. C'est le cas du diclofénac, de la carbamazépine, de l'œstrone et du propranolol. D'autres comme le sulfadiméthoxine, la gabapentine, les 17- α et 17- β -œstradiol au contraire sont peu éliminées par le pilote.

Un pilote d'adsorption sur charbon actif (Carboplus) fait l'objet d'investigations dans le cadre du programme OPUR en collaboration avec le SIAAP. Il offre de bons rendements d'élimination pour les alkylphénols, le benzotriazole, le bisphénol A, les parabènes, le triclocarban et les pesticides et des abattements très variables pour les médicaments et les hormones (Figure 19). D'une manière générale, les micropolluants chargés positivement sont davantage adsorbés sur le charbon actif (chargé négativement).

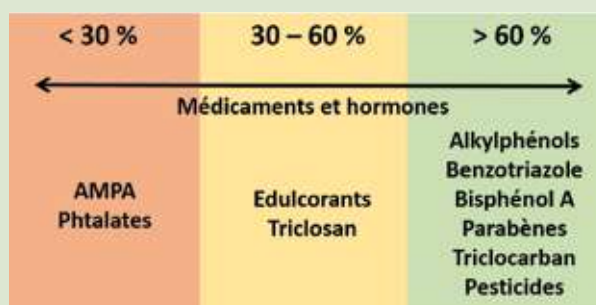


Figure 19 : Taux d'abattement (%) des micropolluants organiques obtenus par adsorption sur charbon actif en micrograins sur le pilote Carboplus (Mailler, 2015). Édulcorants : acesulfame, saccharin et sucralose.

16. Le projet SIPIBEL (site pilote de Bellecombe), débuté en 2012 étudie une vingtaine de médicaments et détergents dans les eaux usées domestiques et hospitalières pour évaluer leur contribution aux flux arrivant en STEU.

17. Projet AMPERES : Analyse de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et les Eaux Superficielles (2006-2009). Projet ANR-05-ECOT-0001.

18. Dont 11 métaux, 14 composés pharmaceutiques, 19 HAP, 5 alkylphénols et 4 pesticides.

19. Projet ARMISTIQ : Amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques (2011-2014).

20. Projet TRIUMPH sur le traitement avancé des micropolluants par ozonation (2012-2016).



Comment gérer les micropolluants dans les eaux pluviales ?

Essentiel

La gestion des eaux pluviales doit assurer une protection à la fois contre les inondations et contre la dégradation de la qualité des milieux aquatiques. Elle est progressivement passée de la seule gestion hydraulique « centralisée » basée sur les événements rares à une maîtrise des flux d'eau et de polluants dès l'origine du ruissellement (parkings, voiries, toits) incluant la gestion des pluies courantes faibles à modérées. **Les eaux de pluie se chargent en micropolluants au cours du ruissellement. Il est donc intéressant de gérer les eaux au plus près de leur source pour réduire la pollution.** Ainsi, pour les eaux de ruissellement peu chargées, une gestion à la source des pluies courantes par infiltration et évapo(transpi)ration via des ouvrages perméables, de faibles dimensions, végétalisés et reposant sur un volume mort permet de réduire significativement les flux polluants rejetés vers l'aval. Pour les effluents plus chargés, les ouvrages écosystémiques ou industrialisés doivent être conçus et dimensionnés de manière à optimiser les processus de rétention et de dégradation des micropolluants. Dans tous les cas, **l'efficacité épuratoire d'un ouvrage dépend du fonctionnement hydrologique de l'ouvrage** (type d'alimentation, temps de rétention hydraulique), **de la qualité des effluents d'entrée** (concentration en micropolluants et spéciation) **et des propriétés des micropolluants considérés.** En effet, **les polluants sous forme particulaire sont bien éliminés dans la plupart des ouvrages** qui reposent sur la décantation et la filtration. **En revanche, les charges polluantes dissoutes ou associées aux particules fines sont plus difficilement maîtrisables** ce qui témoigne des limites d'une gestion seulement curative.

D'une gestion hydraulique centralisée vers une maîtrise à l'amont des flux polluants

Le ruissellement sur les surfaces urbaines de plus en plus imperméabilisées et la collecte des eaux pluviales dans des réseaux engendrent des risques de débordements et d'inondations qui représentent une cause majeure de la dégradation des milieux aquatiques. Jusqu'à la moitié du XX^{ème} siècle, la gestion des flux polluants, tout comme la gestion hydrologique, s'appuyait sur des réseaux et des ouvrages de stockage et/ou traitement centralisés, à l'aval des bassins

versants. Puis, face à l'insuffisance de cette approche, la gestion s'est orientée vers une maîtrise à la source grâce à des ouvrages décentralisés (amont) et intégrés à l'aménagement (Figure 20). Si les ouvrages de gestion à la source ont dans un premier temps été dimensionnés par rapport à la seule rétention des pluies rares (correspondant typiquement à des périodes de retour de l'ordre de 5, 10 ans ou plus), cette pratique est actuellement revue pour répondre à deux enjeux : la réduction des flux polluants transférés vers l'aval et, le retour vers un bilan hydrologique plus proche de l'état naturel. Ceci suppose de concevoir les ouvrages pour une interception et un traitement efficace des pluies courantes (correspondant typiquement à des périodes de retour mensuelles ou inférieures à un ou deux ans).

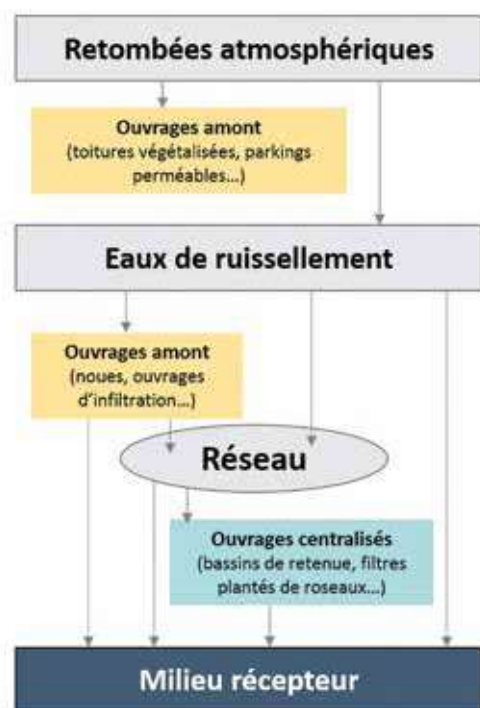


Figure 20 : Gestion centralisée et amont des eaux pluviales en réseaux séparatif ou unitaire.

A qualité variable, gestion adaptée

Les eaux de ruissellement se chargent en micropolluants en lessivant les surfaces urbaines puis lors de leur transport dans le réseau (par contamination croisée, remise en suspension des dépôts, mélange avec des eaux usées (voir page 41). A une échelle amont (échelle de la parcelle), **les eaux de ruissellement sont globalement moins contaminées que les eaux pluviales collectées en aval des réseaux** (voir page 35). C'est surtout vrai pour les surfaces de toitures en tuile, les surfaces piétonnes, les secteurs résidentiels (faible circulation automobile, absence d'industries). **Ces eaux contribuent néanmoins à la pollution diffuse des milieux aquatiques du fait de l'importance des volumes en jeu.** Toutefois, même à petite échelle, il existe une variabilité de la qualité des eaux de ruissellement due à la présence de sources diverses plus ou moins polluantes (voir page 30). L'Agence de l'eau Seine-Normandie propose dans son guide « Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines » une grille d'évaluation *a priori* de la qualité des eaux de ruissellement (Gromaire et al., 2014), dont la mise en œuvre reste cependant subjective.

LIMITER LES VOLUMES DÈS L'AMONT POUR LES EFFLUENTS PEU CHARGÉS

La gestion des eaux de ruissellement peu chargées peut se limiter à une réduction des volumes d'eau. **La gestion hydrologique à l'amont vise à diminuer le ruissellement (et donc la pollution des eaux) et à ralentir le transfert des eaux vers l'aval (stockage temporaire).** Les pluies courantes (niveau de service N1²¹) sont évacuées localement par infiltration vers le sous-sol ou par évapo(transpi)ration via des ouvrages perméables, de préférence végétalisés (Sage, 2016). La réduction à la source des volumes d'eau de pluie (déconnection des eaux pluviales du réseau unitaire) permet également de réduire les surverses des réseaux unitaires en aval et donc de réduire les flux de micropolluants rejetés sans traitement aux milieux (voir exemple n°1).

Il existe une grande diversité d'ouvrages de gestion amont (Figure 21) qui diffèrent par :

- le **mode d'alimentation** qui peut être diffus (apporté par le ruissellement) ou localisé (canalisé) ;
- le **mode de stockage** qui peut être fait en surface (bassins en eau ou bassins secs, revêtement minéral ou végétal) ou en souterrain (bassins, cuves, ou matériaux poreux) ;
- le **mode d'évacuation** des effluents qui peuvent être envoyés vers le réseau, ou directement vers le milieu (eaux de surface ou infiltration dans le sous-sol).

DÉPOLLUER LES EFFLUENTS PLUS CHARGÉS

Pour les effluents plus largement contaminés (ruissellement sur des surfaces polluantes, eaux pluviales à l'aval des réseaux), la réduction des volumes ne suffit pas et **il faut recourir à des processus de dépollution des eaux avant leur rejet vers les milieux souterrains ou superficiels.**

Les ouvrages de dépollution des eaux peuvent être placés dès l'amont (ouvrages décentralisés) ou à l'aval des bassins versants (ouvrages centralisés). Ils peuvent reposer sur des services écosystémiques (rôle épurateur des sols vivants, végétalisés) ou bien sur des dispositifs plus industrialisés (Tableau 16).

21. Le niveau N1 correspond à l'objectif premier de maîtrise des impacts des rejets chroniques sur le milieu aquatique lors des faibles pluies (DGALN et Cerema, 2014).

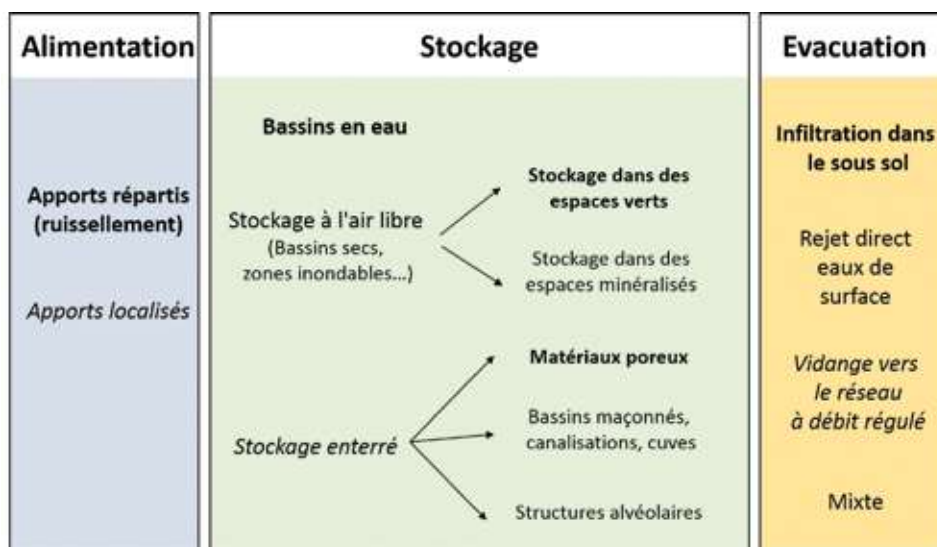


Figure 21 : Typologie des différents ouvrages de gestion hydrologique amont des eaux de ruissellement. En gras, les types d'alimentation, stockage et évacuation permettant d'optimiser les différents processus d'épuration impliqués, en italique ceux pour lesquels ces processus sont les plus faibles.

Nature ouvrages	Echelle de gestion	Exemples d'ouvrages	Type d'effluent	Processus
Ecosystémiques	Centralisée	Filtres plantés de roseaux	Pluvial / Unitaire	- Décantation (quand stockage en surface) - Sorption sur le substrat
	Amont	Noues de filtration, infiltration, jardins de pluie, parkings perméables végétalisés...	Pluvial	- Filtration - Infiltration (si perméables) - Biodégradation
Industrialisés	Centralisée	Ouvrages de décantation	Pluvial	- Décantation
	Amont	Dispositifs compacts	Pluvial	- Décantation, - Adsorption - Filtration

Tableau 16 : Typologie des ouvrages de dépollution des eaux urbaines.

Qu'est ce qui influence l'efficacité des ouvrages vis-à-vis des micropolluants?

Les différents ouvrages de gestion des eaux pluviales présentent des efficacités épuratoires très variables vis-à-vis des micropolluants. Cela s'explique par un grand nombre de facteurs, expliqués ci-dessous.

LES OBJECTIFS ET LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Les ouvrages à but initialement hydrologique (lutte contre les inondations), dimensionnés pour intercepter les événements rares, présentent tout de même des capacités épuratoires indirectes (non recherchée initialement) (voir exemples n°2 et 3). Toutefois, une gestion efficace des flux polluants passe nécessairement par des ouvrages spécifiquement dimensionnés

pour la gestion des flux de polluants. En effet, les pluies courantes sont responsables de la plus grande partie des flux polluants annuels transportés par les eaux de ruissellement. **Afin d'optimiser la réduction des flux polluants, les ouvrages doivent être dimensionnés et conçus pour l'interception de ces pluies courantes (voir exemple n°4).**

Les ouvrages écosystémiques centralisés (ex : filtres plantés de roseaux) sont des ouvrages techniques dont la conception suit des règles bien établies (épaisseur et nature des substrats...), ce qui conduit à des efficacités épuratoires homogènes et contrôlées. En revanche, en gestion amont (noues filtrantes, massif ou bac filtrant, cellule de bio-rétention, jardins de pluie), les ouvrages remplissent de nombreuses fonctions complémentaires (dépollution, qualités paysagères, activités récréatives, biodiversité...). Il n'existe pas encore en France de guide de conception de ces ouvrages dont l'efficacité épuratoire peut alors être très variable (voir exemples n°5 et 6).

LE FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE ET LES PROCESSUS MIS EN ŒUVRE

Qu'ils soient fortuits ou recherchés, les processus épuratoires sont toujours les mêmes (voir page 50) :

- la **décantation** (généralement favorisée par un volume de stockage et une hydrodynamique de l'ouvrage bien conçue),
- l'**adsorption** sur des substrats,
- la **filtration** par des matériaux poreux,
- la **biodégradation** due à la présence de microorganismes dans l'eau et le sol,
- la **volatilisation** quand l'ouvrage est soumis à une aération (naturelle ou forcée) ou quand l'eau est stagnante,
- la **photolyse** (dégradation par le rayonnement solaire) pour les ouvrages à ciel ouvert.

Selon le type d'ouvrage, ces processus sont plus ou moins nombreux et plus ou moins performants. **L'augmentation du temps de séjour de l'eau dans l'ouvrage favorise ces processus de dépollution.** Les ouvrages écosystémiques par exemple (Figure 22) permettent d'optimiser les processus de décantation dans la partie stockante et les processus d'infiltration, d'adsorption et de précipitation des micropolluants au travers et sur le substrat vivant (matière organique). Ils favorisent également les processus dissipatifs tels que la volatilisation, la photolyse à la surface de l'ouvrage et la biodégradation (voir exemples n°5, 6 et 7).

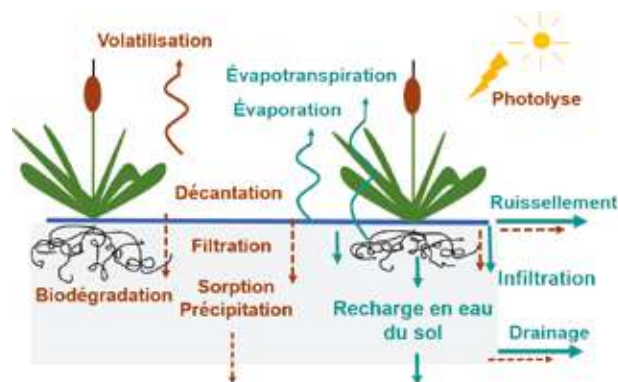


Figure 22 : Processus affectant l'eau (bleus) et les micropolluants (marrons) dans les ouvrages écosystémiques (modifiée d'après Gromaire et al., 2016).

Remarque : l'estimation de l'efficacité épuratoire des ouvrages reposant sur l'infiltration est difficile puisque, dans la plupart des cas, les eaux s'infiltrent de façon diffuse et les concentrations de sortie sont difficilement mesurables.

PROPRIÉTÉS DES MICROPOLLUANTS

Les propriétés physico-chimiques des micropolluants déterminent en grande partie leur sensibilité aux processus opérant dans les ouvrages. **Les polluants hydrophobes seront plus facilement éliminés par adsorption sur les substrats ou sur les matières en suspension qui pourront ensuite décanter. Les substances biodégradables et/ou volatiles seront sensibles aux processus dissipatifs opérant dans les ouvrages (voir page 50).**

S'il a longtemps été admis que les micropolluants classiquement étudiés (métaux, HAP) des eaux pluviales étaient principalement particuliers, il convient de noter que **certains micropolluants sont préférentiellement présents sous forme dissoute (voir page 50). Cette fraction dissoute est plus importante dans les eaux de ruissellement amont, ce qui s'explique notamment par des concentrations en MES plus faibles (voir page 35).**

Le choix des dispositifs de traitement devra donc être adapté au niveau de contamination mais aussi à la répartition dissous/particulaire des micropolluants au sein des matrices considérées.

Remarque : les ouvrages proposant des traitements par décantation ou filtration (type filtres à sable) ne sont donc pas adaptés pour traiter les eaux de ruissellement des zones résidentielles ou de voiries à trafic modéré contenant peu de MES.

QUELQUES RÉSULTATS

EXEMPLE N°1 : IMPACT D'UNE GESTION À L'AMONT À L'ÉCHELLE DU DÉPARTEMENT

Des simulations ont été réalisées sur deux bassins versants des Hauts-de-Seine (92) particulièrement sensibles aux épisodes de surverses de déversoirs d'orage (volumes importants et fréquence élevée des surverses). Il a été montré par modélisation que l'interception des huit premiers millimètres de pluie via des techniques alternatives offre un effet limité sur les surverses unitaires. La déconnection et l'infiltration totale des eaux d'une partie du bassin versant s'avèrent plus efficaces pour la réduction des volumes déversés et des flux de micropolluants associés. Pour une surface équipée de techniques alternatives représentant 20 % du bassin, les volumes déversés sont réduits de 40 % (Gromaire et al., 2016).

EXEMPLE N°2 : EFFICACITÉ D'OUVRAGES DE GESTION HYDROLOGIQUE AMONT

Des ouvrages de type : stockage enterré, toit stockant, jardin et place inondables, noues d'un quartier de la banlieue parisienne (Seine-Saint-Denis, 93), principalement destinés à l'interception des événements rares (objectif de régulation des débits à 10 L/s/ha) permettent de réduire les volumes annuels de 43 à 55 % comparé à un réseau séparatif classique (Bressy, 2010). **Ces ouvrages permettent également une réduction de masse des micropolluants très variable entre 20 et 80 %.** Cette variabilité s'explique par la nature des polluants, leur distribution dissous/particulaire et les différents fonctionnements des ouvrages.

EXEMPLE N° 3 : EFFICACITÉ ÉPURATOIRE D'UN BASSIN DE RETENUE

Le bassin Django Reinhardt à Chassieu (banlieue de Lyon) est un ouvrage de retenue/infiltration qui reçoit les eaux pluviales d'un bassin industriel de 185 ha équipé d'un réseau séparatif. L'efficacité épuratoire de la partie décantation, constituée d'un bassin sec à fond étanche, a été mesurée sur onze campagnes pour un ensemble de micropolluants (Sebastian, 2013). Les efficacités sont très variables selon les composés mais aussi, pour certains, selon la forme sous laquelle ils se trouvent. **La fraction particulaire des micropolluants est globalement bien éliminée, avec une efficacité comprise entre 50 et 90 %, tandis que la fraction dissoute est abattue entre 30 et 60 %.** L'efficacité est avérée pour la majorité des métaux et HAP, et plus limitée pour les PBDE et les alkylphénols éthoxylés. Elle est très limitée pour les octylphénols et nonylphénols.

Enfin, des efficacités négatives ont été mesurées pour certains pesticides, ce qui témoigne d'un relargage possible depuis les sédiments accumulés au fond du bassin.

EXEMPLE N° 4 : DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES AMONT PERMÉABLES POUR LA GESTION DES PLUIES COURANTES

Pour des sols caractérisés par une bonne perméabilité (conductivité hydraulique $> 10^{-6}$ m/s), les flux annuels de contaminants dirigés vers l'aval peuvent être réduits d'environ 80 % en ayant recours à des ouvrages d'infiltration amont, de profondeur réduite (quelques dizaines de centimètres) et de dimensions modestes (2 à 10 % de la surface d'apport). Dans le cas de sols moins propices à l'infiltration (conductivités hydrauliques $\leq 10^{-6}$ m/s), des dispositifs moins profonds et présentant des surfaces d'infiltration et d'évaporation plus importantes devraient être privilégiés (Sage, 2016).

EXEMPLE N° 5 : EFFICACITÉ ÉPURATOIRE DES FILTRES PLANTÉS DE ROSEAUX

Les systèmes extensifs à macrophytes peuvent être utilisés pour traiter les eaux usées de petites agglomérations, les eaux pluviales strictes ou les surverses unitaires de temps de pluie avant leur rejet dans le milieu. Le filtre planté de roseaux à écoulement vertical (FPRV) géré par le SIVOA (Syndicat mixte de la vallée de l'Orge aval) et étudié dans le cadre du projet ADEPTE²² reçoit les eaux de ruissellement d'un bassin péri-urbain de 33 ha en région parisienne. Un bassin de décantation est placé en amont du filtre planté. A l'entrée du FPRV, 60 à 90 % des nonylphénols et du bisphénol A se trouvent sous forme dissoute. **L'élimination du bisphénol A et des nonylphénols est supérieure à 70 %. La rétention des MES ne suffit pas à elle seule à expliquer ces taux. Une élimination de la fraction dissoute est également observée.** Cette dernière peut être liée, soit à l'adsorption de ces molécules au sein du massif filtrant ou sur le système racinaire des roseaux et/ou à leur dégradation (Pham et al., 2014). Dans le cadre du projet ANR SEGTEUP²³, les mesures réalisées sur un pilote FPRV de 20 m², alimenté alternativement en unitaire et en pluvial strict, **confirment la très bonne rétention des MES et de la fraction particulaire des HAP et des métaux (> 90 %).** En revanche, l'élimination est négligeable pour la fraction dissoute de ces micropolluants. Sur le long terme, on peut s'attendre à une dégradation des HAP retenus sur les filtres (Molle et al., 2013).

22. Projet ADEPTE : Aide au Dimensionnement pour la gestion des Eaux Pluviales par Traitement Extensif (2013-2016). Projet issu de l'appel d'offre « Projets innovants dans le domaine de l'ingénierie écologique ».

23. Projet SEGTEUP : Systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie (2009-2013). Projet ANR-08-ECOT-0013.

EXEMPLE N° 6 : EFFICACITÉ ÉPURATOIRE D'UNE NOUE FILTRANTE AMONT

Une noue filtrante (i.e. noue avec massif filtrant sous-jacent) a été mise en place pour le traitement des eaux de ruissellement chargées d'une chaussée à double voie de circulation située à Compans en région parisienne (projet ROULÉPUR²⁴, *Flanagan, 2017*). **Les premiers résultats obtenus sur ce dispositif montrent une bonne rétention des MES et des fractions particulières des micropolluants (HAP, DEHP, bisphénol A et alkylphénols) grâce à une décantation efficace et une filtration par le substrat. L'efficacité pour la fraction dissoute est plus variable.** Cela s'explique notamment par le fait que l'adsorption des micropolluants dissous dépend de la présence de matière organique dissoute et peut être réduite par l'existence de chemins préférentiels de l'eau et le transport colloïdal qui ne permettent pas un temps de contact suffisant entre les polluants et le substrat.

EXEMPLE N° 7 : EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS INDUSTRIALISÉS COMPACTS

Les ouvrages industrialisés mettant en œuvre la décantation dynamique des micropolluants particuliers sont développés depuis les années 1990. Plus récemment, des dispositifs destinés à éliminer les particules fines et les micropolluants dissous voient le jour. Il s'agit d'ouvrages plus ou moins compacts, surtout destinés à une gestion amont. Ils peuvent être placés aux niveaux des caniveaux, des regards ou encore dans le sol sous forme de tubes enterrés. Ils reposent tous sur la décantation, la filtration et l'adsorption sur des filtres solides ou des lits fluidisés. Certains permettent l'infiltration vers le sous-sol tandis que d'autres restituent l'eau traitée vers les réseaux en aval. Ces dispositifs nécessitent un entretien régulier. Les essais en laboratoire sont prometteurs mais il y a encore peu de retours d'expérience pour juger de leur efficacité in situ (*Gromaire et al., 2016*).

Que deviennent les micropolluants?

Les micropolluants éliminés de la phase aqueuse par décantation, filtration ou adsorption se retrouvent piégés sur la phase solide. Lorsque les conditions le permettent (voir page 50), certains micropolluants organiques sont dégradés ou volatilisés à une échelle de temps plus longue que l'évènement pluvieux tandis que les métaux et les micropolluants organiques persistants s'accumulent dans la phase solide.

Les profils de sols de nombreux ouvrages de filtration/infiltration (centralisés et amont) montrent que **les polluants hydrophobes (HAP et métaux, BDE-209, nonylphénols) s'accumulent dans les horizons de surface. Au-delà d'un mètre de profondeur les concentrations sont de nouveau proches de celles du fond géochimique** (*Sebastian, 2013 ; Tedoldi, 2017*).

Dans certains cas, les micropolluants dissous, peuvent atteindre les nappes sous-jacentes. A Lyon, des échantillonneurs passifs placés dans des piézomètres en amont et à l'aval de quatre bassins d'infiltration centralisés ont mis en évidence une augmentation des concentrations en pesticides (atrazine, déséthyl atrazine et simazine) entre l'amont et l'aval de ces bassins (*Marmonier et al., 2013*). Il convient de noter que **plus le rapport surface d'infiltration/surface d'alimentation est grand (cas de la gestion amont) moins le risque de transfert en profondeur des micropolluants est important.**

Dans les ouvrages de gestion des eaux, on observe la formation de dépôts, sédiments et boues associées au fonctionnement de l'ouvrage, qui doivent être évacués et posent des questions quant à leur gestion et leur traitement (voir page 68). Cela prouve la nécessité d'une réduction à la source des émissions des micropolluants (voir page 73).

24. Projet faisant parti de l'appel à projets « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » portés par l'Agence française pour la biodiversité, les Agences de l'eau et le ministère de la Transition écologique et solidaire.



Quelle est la qualité des **sous-produits de l'assainissement** et les conséquences sur leur devenir ?

Essentiel

Toutes les techniques d'assainissement génèrent des sous-produits solides liés à leur fonctionnement (dépôts, produits de filtration) et leur entretien. Parmi eux on trouve classiquement les boues de STEU, les sédiments de réseau (chambres à sable, collecteurs, avaloirs), les sédiments de bassins (décantation, infiltration) ou de fossés. Mais on peut aussi considérer les différents substrats de filtration, d'infiltration et d'adsorption (matériaux filtrants et adsorbants, sols des ouvrages perméables...) ou encore les végétaux des ouvrages plantés. **Ces sous-produits de l'assainissement sont plus ou moins contaminés en micropolluants** car les techniques de dépollution des eaux s'appuient sur des mécanismes de transfert des polluants vers la matrice solide par décantation, adsorption et filtration (voir pages 58 et 62). D'après le code de l'environnement, ces sous-produits sont considérés comme des déchets et il appartient aux gestionnaires d'en assurer l'élimination dans le respect de la réglementation en vigueur. En outre, dans une volonté de développement durable, **il est demandé aux gestionnaires une valorisation maximale de ces déchets**. Cependant, **l'orientation vers les filières de traitement et/ou de valorisation de ces sous-produits de l'assainissement n'est pas clairement spécifiée par la réglementation** (sauf pour les boues de STEU). **Si les boues de STEU après traitement peuvent être épandues ou compostées, les sédiments de curage de bassins ou de réseaux sont globalement compatibles, pour la plupart après traitement, avec une utilisation dans les techniques routières. Pour les sous-produits liés à des techniques de dépollution plus récentes (charbons actifs, dispositifs industrialisés compacts...), les voies de valorisation ne sont pas encore établies.** Au vu des contraintes législatives de plus en plus fortes dans le domaine de l'environnement, des travaux de recherche sont menés afin de caractériser les contaminations en micropolluants de ces déchets pour optimiser les traitements et les voies de valorisation.

Quels sont ces sous-produits ?

Les différents ouvrages de gestion des eaux urbaines, qu'ils soient centralisés, amont, en assainissement séparatif ou en unitaire, à visée purement hydrologique ou de dépollution, génèrent des sous-produits au cours de leur fonctionnement et de leur entretien (Figure 23). Il peut s'agir de boues de STEU, de dépôts dans les réseaux (chambres à sable, bâches de relevage et les collecteurs eux-mêmes) ou au fond d'ouvrages de rétention et de fossés ou encore sur les voiries. On considère également les substrats ayant un rôle de filtration ou d'adsorption dans ces ouvrages. C'est le cas des sols dans les ouvrages perméables, des sables utilisés dans les différents ouvrages de

filtration (amont ou centralisés), ou les adsorbants utilisés dans certains dispositifs de traitement décentralisé ou traitement tertiaire des micropolluants (ex : charbon actif). Ces différents dépôts ou substrats doivent être évacués ou renouvelés plus ou moins fréquemment pour assurer le bon fonctionnement des ouvrages d'assainissement. **L'ensemble de ces sous-produits est contaminé par les micropolluants.** En effet, au cours de la dépollution des eaux, qu'elle soit induite ou favorisée, une grande majorité des micropolluants est transférée vers la matrice solide. Les micropolluants, surtout les composés hydrophobes, s'adsorbent sur les différents substrats ou sur les matières en suspension qui sédimentent ou sont retenues par filtration.



Figure 23 : Différents types de sous-produits de l'assainissement (EU : eaux usées, EP : eaux pluviales).

Réglementation-Valorisation

STATUT DE DÉCHETS

Les sous-produits de l'assainissement sont considérés comme des déchets au titre de l'article L541-1-1 du code de l'environnement, même s'ils ne figurent pas tous dans la nomenclature des déchets (*articles R.541-7 et R.541-11*). Les gestionnaires d'ouvrages ou de réseau sont donc dans l'obligation d'en assurer l'élimination mais aussi de veiller à la façon dont ils sont collectés, transportés, traités et valorisés²⁵. La gestion des sous-produits de l'assainissement est également mentionnée comme faisant partie du diagnostic des systèmes d'assainissement²⁶.

VERS UNE VALORISATION MAXIMALE

L'enfouissement et le stockage des déchets doivent être réservés aux seuls déchets « ultimes » pour lesquels aucune valorisation n'est possible²⁷. **Les gestionnaires de l'assainissement sont au contraire fortement incités à valoriser ces déchets²⁸. Cependant, seules les boues de STEU sont réglementées, ce qui complexifie la mission des gestionnaires.**

VOIES DE VALORISATION ACTUELLES

Les voies de valorisation les plus répandues sont l'épandage agricole, le compostage ou la production énergétique (méthanisation ou incinération) pour les boues de STEU et les techniques routières pour les sédiments de curage. Plusieurs critères participent à l'orientation des sédiments vers des voies de traitement ou de valorisation.

- **Les concentrations en azote et phosphore** : les sous-produits ne présentant aucun intérêt agronomique ne peuvent pas être épandus.

- **La teneur en matière organique** : les produits riches en matière organique ne sont pas adaptés à la valorisation en technique routière car instables mais peuvent au contraire être méthanisés. Au contraire, les produits contenant trop peu de matière organique ne pourront pas être incinérés.
- **La teneur en matière sèche (siccité)** : les sédiments avec de fortes teneurs en eau ne peuvent être incinérés.
- **La granulométrie** : la sélection des matériaux pour les techniques de construction routière s'appuie essentiellement sur les fractions granulométriques des sédiments.
- Actuellement, **les niveaux de contamination en micropolluants des sous-produits de l'assainissement ne constituent pas un critère réglementaire** pour l'orientation vers les voies de traitement/valorisation (excepté pour les boues de STEU). **Pourtant, la réutilisation de ces sous-produits contaminés et non traités pourrait constituer une source d'émission de micropolluants vers les milieux.** C'est pourquoi les observatoires d'Urbis ont étudié les teneurs en micropolluants de ces sous-produits afin de caractériser ces vecteurs potentiels et d'optimiser leur traitement et valorisation.

Les boues de STEU

Un million de tonnes de boues de STEU est produit chaque année en France. Les principales voies de valorisation des boues sont l'incinération (valorisation énergétique), le compostage et l'épandage agricole. Des textes nationaux encadrent les teneurs en métaux, PCB et HAP (Tableau 17) à respecter dans les boues pour l'épandage.

25. Loi n° 75-633 du 15/07/75 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. Articles L.541-1 et L.541-2 du code de l'environnement.

26. Arrêté du 21/07/15 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif.

27. Loi de transition énergétique pour la croissance verte n°2015-992 du 17/08/15.

28. - Loi n° 92-646 du 13/07/92 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement.

- Loi Grenelle II n°2010-188 du 12/07/10. Directive n° 2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.

- Ordonnance n° 2010-1579 du 17/12/10 portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine des déchets.

	Valeur limite (mg/kg de matière sèche)	
	Cas général	Epandage sur pâturages
Σ7PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)	0.8	0.8
Fluoranthène	5	4
Benzo[b]fluoranthène	2.5	2.5
Benzo[a]pyrène	2	1.5

Tableau 17 : Valeurs limites fixées par la France en PCB (somme de 7 PCB) et HAP (arrêté du 08/01/1998²⁹).

NIVEAUX DE CONTAMINATION

Des travaux ont été menés sur la contamination en micropolluants des boues de STEU et l'efficacité des traitements sur ces concentrations (Mailler, 2015). L'empreinte en micropolluants des différents types de boues (primaire, boues activées...) est relativement similaire (Figure 24) avec :

- des concentrations maximales ($> 10^5$ µg/kg) pour les alkylbenzènes sulfonates linéaires (LAS) qui sont largement utilisés comme tensioactifs dans de nombreux détergents,
- des concentrations intermédiaires ($10^2 - 10^4$ µg/kg) en alkylphénols et en phtalates,
- des concentrations plus faibles ($< 10^3$ µg/kg) pour les organoétains, les composés perfluorés et les résidus pharmaceutiques.

EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS

Les boues de STEU doivent être traitées avant d'être épandues³⁰. Ces traitements visent principalement à réduire les volumes et à les stabiliser. Il apparaît que la centrifugation n'a pas d'impact significatif sur les micropolluants. Le séchage thermique permet une légère élimination des alkylphénols, des HAP et du monobutylétain probablement par volatilisation. La digestion anaérobie élimine fortement les flux d'alkylphénols, de DEHP, de BDE 209 (> 50 %) et d'organo-étains (40 %). **Les métaux sont les seuls composés pour lesquels aucune élimination n'est observée pour aucun procédé** (Mailler, 2015).

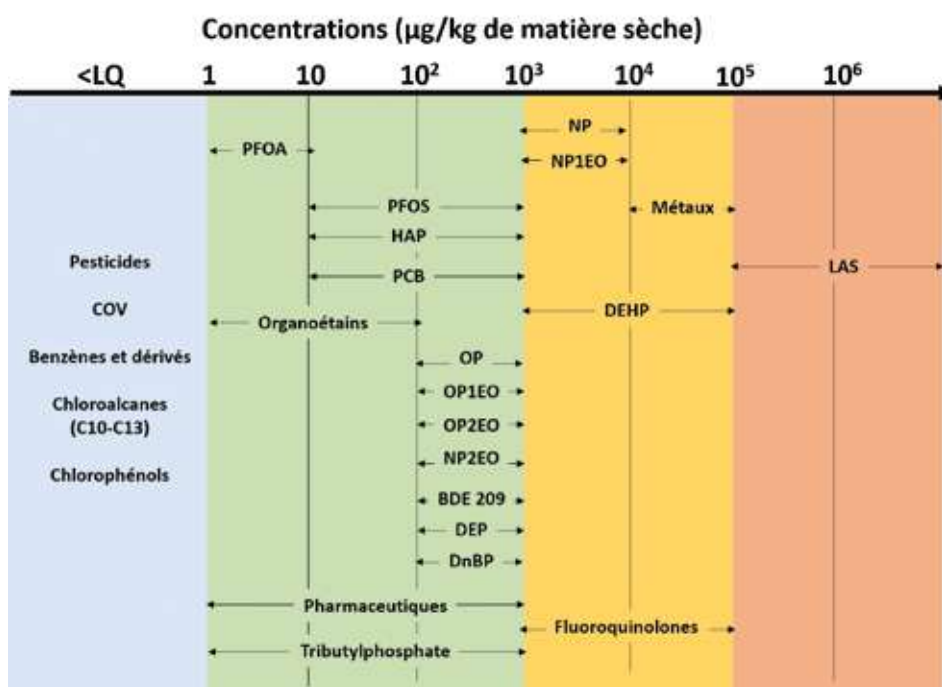


Figure 24 : Teneurs en micropolluants dans les boues de STEU du SIAAP (COV : composés organiques volatils ; PFOA et PFOS : composés perfluorés ; NP, NP1EO, NP2EO, OP, OP1EO, OP2EO : alkylphénols ; DEHP, DEP, BBP, DnBP : phtalates ; LAS : alkylbenzènes sulfonates linéaires ; Mailler, 2015).

29. Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n°97-1/33 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

30. Directive n° 1999/31/CE du 26/04/99 concernant la mise en décharge des déchets.

Les sédiments de curage

L'accumulation de sédiments liée à la décantation des matières en suspension peut nuire au bon fonctionnement des ouvrages d'assainissement. Un curage d'entretien doit donc être réalisé périodiquement pour garantir l'efficacité des ouvrages.

Les gestionnaires sont tenus de réaliser un diagnostic des produits issus de ce curage³¹ mais sans outils ou guide spécifique pour les y aider. De ce fait, les valeurs « cibles » (valeurs souhaitables à atteindre) et « d'intervention » (seuil au-dessus duquel un sol est considéré comme pollué) proposées pour les HAP et les métaux par la norme hollandaise sur la qualité des sols³² sont parfois utilisées comme indicateurs pour une première orientation du choix des filières (Tableau 18). Le caractère très restrictif de cette norme est en adéquation avec le renforcement réglementaire lié aux ressources et aux milieux aquatiques.

mg/kg de matière sèche	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	HAP
Valeurs cibles	0.8	100	36	35	85	140	1
Valeurs d'intervention	12	380	190	210	530	720	40

Tableau 18 : Valeurs cibles et d'intervention de la norme hollandaise (Pétavy, 2013).

LES SÉDIMENTS DE FOND DE BASSIN

Les volumes curés ont été estimés entre 5 et 6 millions de matière sèche par an en France. Les concentrations en micropolluants dans les sédiments de bassins sont très variables d'un site à un autre. Ceci s'explique par leur provenance, la conception des ouvrages ainsi que les activités et occupations des sols du bassin versant. Au sein d'un ouvrage, les concentrations en micropolluants des sédiments sont souvent supérieures aux valeurs d'interventions des normes hollandaises. Leur épandage est à proscrire en raison de leur faible valeur agronomique (pauvre en N et P) et de la présence variable de composés toxiques³³.

Remarque : les travaux récents menés dans le cadre du projet ANR CABRRES³⁴ (OTHU) montrent qu'il semble intéressant de ne pas curer les sédiments « frais » et de les laisser se

transformer sur place pour diminuer leur écotoxicité. Ce résultat ouvre de nouvelles perspectives concernant leur traitement et valorisation.

LES SÉDIMENTS DE CURAGE (CHAMBRES À SABLE, COLLECTEURS)

Le curage des chambres à sable et collecteurs génère 900 000 tonnes de sédiments par an. Ils sont globalement plus grossiers que les sédiments de fond de bassins. On observe une forte variabilité des concentrations en micropolluants (métaux et HAP) à la fois entre les différentes chambres à sable mais aussi au sein d'une chambre à sable, ce qui complexifie la gestion de ces sous-produits.

TRAITEMENT/VALORISATION DE CES SÉDIMENTS

Les sédiments de curage (bassins, chambres à sable, collecteurs) sont actuellement majoritairement envoyés en centre de traitement. Ils sont quasiment toujours acceptés même si leurs teneurs en certains métaux sont supérieures aux seuils affichés par ces centres. Le traitement proposé à l'issue du projet ANR INOGEV³⁵ consiste en une succession de séparations physiques dont l'objectif est de concentrer les micropolluants au sein d'une fraction réduite de l'échantillon afin de pouvoir valoriser les fractions dépolluées.

- La fraction la plus grossière (> 30 mm) est envoyée dans les filières de traitement des déchets ménagers.
- **La fraction la plus fine, inférieure à 60 µm, est généralement considérée comme la plus contaminée en micropolluants.** Elle est isolée par criblage, attrition ou hydrocyclonage puis envoyée dans la filière de traitement des eaux (décanteur et filtre à presse) pour y être déshydratée et éliminée (Pétavy, 2013).
- La fraction comprise entre 30 mm et 60 µm, dont une partie (< 2 mm - 60 µm) correspond aux sables, est caractérisée physiquement en vue de définir les filières potentielles de valorisation, le plus souvent vers les techniques routières. Dans le cas contraire, ils sont éliminés en décharge de classe 1.

Dans les faits, une grande partie des sédiments de curage provenant des chambres à sable et des collecteurs est finalement envoyée en centre d'enfouissement technique car peu d'entreprises acceptent de les utiliser.

31. Circulaire du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau routier national.

32. Circulaire du 22 décembre 1994 du ministère hollandais VROM, fixant des valeurs cibles et des valeurs d'interventions.

33. Décret du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

34. Projet CABRRES : Caractérisation chimique, microbiologique, écotoxicologique et spatio-temporelle des contaminants des Bassins de Retenue des eaux pluviales urbaines : évaluation et gestion des Risques Environnementaux et Sanitaires associés. Projet ANR-11-CESA-0012 (2012-2016).

35. Projet INOGEV : Innovations pour la Gestion durable de l'Eau en Ville (2010-2013). Projet ANR Villes durables 2009.

Les « nouveaux » sous-produits

D'autres sous-produits sont plus récents et leur gestion n'est pas encore bien établie.

LES SOLS DES OUVRAGES D'INFILTRATION

À l'heure actuelle, la gestion des sols présents dans les ouvrages d'infiltration n'intervient qu'en cas d'insuffisance des capacités d'infiltration et il n'existe pas encore de filière de valorisation spécifique. Néanmoins, il a été observé que pour des effluents peu chargés et pour un rapport « surface d'infiltration/surface d'alimentation » assez grand ($> 5\%$), l'accumulation de micropolluants dans les sols est très lente et ne nécessite pas d'intervention, même après une quinzaine d'années. En région parisienne, la contamination des sols en HAP et métaux d'une dizaine d'ouvrages d'infiltration amont a été étudiée (Tedoldi, 2017). Il apparaît que les niveaux de contamination de ces sols sont très variables et dépendent de l'occupation du bassin versant d'apport et des propriétés des sols (capacité d'adsorption). En outre, la contamination en métaux et en HAP au sein d'un ouvrage est restreinte à la partie la plus proche de l'arrivée des eaux de ruissellement et aux premières dizaines de centimètres de profondeur. Dans ces zones, les teneurs de surface peuvent atteindre 350 mg/kg pour le Cu, 250 mg/kg pour le Pb, 1500 mg/kg pour le Zn, 3 mg/kg pour le Cd et 16 mg/kg pour la somme des seize HAP.

De manière générale, il est recommandé, dans la conception de ces ouvrages, de prévoir des modalités permettant de retirer facilement, après un certain nombre d'années de fonctionnement, les couches de sols contaminés, de procéder à leur traitement, et à leur remplacement par des couches de sols non contaminées ou traitées.

LES SUBSTRATS FILTRANTS/ADSORBANTS

La question de la gestion des sous-produits se pose également pour les substrats de filtration des ouvrages de type filtres plantés, essentiellement composés de sables. Sur un filtre planté de roseaux à écoulement vertical recevant les eaux de ruissellement d'un bassin de 33 ha (Essonne, 91), les concentrations en alkylphénols et bisphénol A dans le substrat sont proches, voire inférieures à celles mesurées dans les sols franciliens (Pham et al., 2014). Cette observation laisse penser que malgré l'apport continu d'une charge polluante, ces composés ne s'accumulent pas dans les premiers centimètres du massif filtrant étudié. À la surface de ces ouvrages, on observe la formation d'une croûte de dépôt, semblable à celle des bassins d'infiltration. Celle-ci est jusqu'à présent traitée comme des boues de STEU. Les végétaux des ouvrages plantés assurent principalement un rôle physique d'aération du sol et de support du développement bactérien. Ils sont régulièrement faucardés et généralement envoyés en centre pour les déchets verts.

La question de la gestion et de la valorisation reste également ouverte pour les différents substrats de filtration/adsorption des dispositifs industrialisés décentralisés. Pour le moment, ces filtres sont généralement gérés par les sociétés qui les produisent. Les charbons actifs utilisés comme substrat d'adsorption en traitement tertiaire pour l'élimination des micropolluants suivent un cycle de reconditionnement et de réactivation pour être réutilisés dans le même procédé.



Quelles alternatives à la gestion curative des micropolluants ?

Essentiel

Une gestion purement curative des micropolluants présente d'importantes limites. Les rendements épuratoires limités pour certains micropolluants et les rejets sans traitement d'une partie des effluents conduisent à la dégradation des milieux. Aussi, une gestion préventive, visant à réduire les émissions de micropolluants à la source, doit être recherchée.

La réduction à la source des micropolluants urbains nécessite une gestion intégrée et la responsabilisation de tous les acteurs (industriels, artisans, consommateurs, collectivités, institutions scientifiques et politiques).

Cette gestion préventive passe par différents types d'actions comme le choix de matériaux moins polluants dès la production et la fabrication, une amélioration des pratiques des collectivités (entretien des espaces verts, des voiries...), des industriels ou des artisans (entretien des façades) mais aussi des particuliers (sobriété écologique, changement de pratiques).

Le principal moteur de réels changements de pratiques réside dans la réglementation. En France, l'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE) favorise aujourd'hui l'identification des sources de contamination des eaux usées pour permettre une réduction des émissions. A l'échelle européenne, le règlement REACH impose aux industriels de veiller à l'innocuité vis à vis de la santé humaine et environnementale des substances fabriquées ou importées. Par ailleurs, des aides financières sont attribuées par les Agences de l'eau pour encourager les actions individuelles ou collectives (réalisation d'études diagnostiques, études d'impact, mise en place de techniques moins polluantes...).

Enfin, la sensibilisation et l'information sur le sujet des micropolluants de tous les acteurs restent une priorité et une nécessité pour une lutte efficace contre les micropolluants. C'est l'objectif de cet ouvrage qui permet la synthèse et la valorisation des résultats des chercheurs vers les opérationnels de l'eau.

Les limites d'une approche uniquement curative dans la lutte contre les micropolluants

Malgré les réels bénéfices que représentent les traitements curatifs des micropolluants dans les eaux usées ou pluviales sur la qualité des rejets, cette approche comporte de nombreuses limites qui mettent en lumière la nécessité d'une gestion préventive.

- Les abattements en station de traitement des eaux usées (STEU) ou dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales atteignent en général 80 % (pour les micropolluants hydrophobes, biodégradables ou volatilisables) tandis que les

micropolluants présents sous forme dissoute sont très mal maîtrisés (voir pages 58 et 62).

- Les ouvrages de traitement (eaux usées, eaux pluviales) n'interceptent qu'une partie des flux polluants. Le reste étant déversé sans traitement dans le milieu récepteur (eaux pluviales des réseaux séparatifs strictes et surverses par temps de pluie des réseaux unitaires).
- Pour l'ensemble des techniques de dépollution, les micropolluants hydrophobes sont en grande partie piégés dans la matrice solide (boues, sols, sédiments, substrats filtrants et adsorbants) ce qui soulève dans le secteur de l'assainissement des questions de gestion des sous-produits (traitement, valorisation) et des risques associés (voir page 68).

- L'effet des traitements tertiaires (procédés d'oxydation) dans les STEU n'est pas totalement cerné. On peut citer le **risque de formation de produits de dégradation** dont on ignore les effets et qui ne sont pas abattus.
- Les **coûts des traitements des eaux sont élevés**, notamment pour les traitements tertiaires dans les STEU. L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) a mené une étude exploratoire qui compare les coûts d'une gestion préventive (changements d'usages, substitution) et d'une gestion curative par traitement tertiaire (nano filtration). En considérant des performances environnementales égales et bien que les incertitudes soient grandes, les résultats montrent que **les coûts de traitement sont supérieurs aux coûts d'une substitution à la source des micropolluants considérés dans l'étude** (*Cantuarias-Villessuzanne et Mombelli, 2015*).

Ces limites indiquent que l'approche curative n'est pas une solution ultime et que nous avons tout à perdre, en l'état actuel des choses, à ne pas travailler sur les aspects préventifs.

Vers une réduction des émissions

Une autre approche de gestion, cette fois-ci préventive, consiste à supprimer ou réduire la présence des micropolluants dans les produits que nous produisons et utilisons pour empêcher leur émission vers le milieu via les eaux urbaines (eaux de ruissellement et eaux usées).

CHOIX DES MATÉRIAUX MOINS POLLUANTS

Les matériaux de construction, tout comme les consommables automobiles, sont reconnus comme étant des sources importantes de micropolluants vers les eaux de ruissellement (métaux, alkylphénols, voir page 30). En ce qui concerne les toitures métalliques, une étude menée dans le cadre d'OPUR (*Robert-Sainte, 2009*) a montré le potentiel polluant associé aux matériaux plomb, cuivre et zinc, tandis que les travaux menés dans le projet ANR INOGEV³⁶ (*Lamprea et al., 2017*) ont mis en évidence le potentiel d'émission d'alkylphénols et de bisphénol A par une grande variété de matériaux urbains (PVC, membranes d'étanchéité, polycarbonate, bétons) et automobiles (carrosserie, pneumatiques). Pour réduire l'impact de ces matériaux sur les eaux pluviales, il est nécessaire de mettre en place des procédures standardisées (norme, certification) pour l'évaluation du potentiel émissif, pour un large panel de micropolluants, des matériaux entrant en contact avec la pluie. **Ceci permettrait aux différents acteurs (politiques publiques, maîtres d'ouvrage, consommateurs) de choisir en connaissance de cause.** Cela existe par exemple pour l'étiquetage des composés organiques volatils (COV) des matériaux de construction et de décoration.

AMÉLIORATION DES PRATIQUES DES COLLECTIVITÉS

En ce qui concerne la réduction des micropolluants dans les eaux pluviales, l'exemple le plus marquant est la mise en œuvre du plan « zérophyto » à l'échelle des collectivités qui a conduit à une utilisation raisonnée des herbicides pour l'entretien des espaces verts urbains (gestionnaires d'infrastructures et particuliers).

CHANGEMENT DE PRATIQUES DES PARTICULIERS

En ce qui concerne les eaux usées, la réduction des micropolluants passe d'abord par les changements de pratiques des industriels ainsi que des consommateurs. Les changements de pratiques sont des processus complexes à appréhender et font appel aux sciences humaines et sociales afin de comprendre et d'identifier les pratiques, les moteurs, les leviers ou au contraire les freins aux changements de ces pratiques. Certains projets de l'appel à projets : « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » (Agence française pour la biodiversité, Agences de l'eau et ministère de la Transition écologique et solidaire) portent spécifiquement sur ces questions.

- Le projet LUMIEAU-Stra étudie la perception des ménages et des artisans vis-à-vis du réseau d'assainissement et de leurs propres rejets.
- Le projet Cosmet'eau s'intéresse aux lanceurs d'alerte, à la sensibilisation des consommateurs (et des pouvoirs publics) et aux changements de pratiques liés aux produits cosmétiques.
- Le projet SIPIBEL-RILACT s'intéresse à la problématique des médicaments, détergents et biocides des établissements de soin.

Les résultats de ces projets (toujours en cours) devraient faire l'objet de guides à destination des collectivités pour les aider dans cet objectif de réduction des micropolluants.

En ce qui concerne les eaux pluviales, les changements de pratiques liées aux transports (co-voiturage, utilisation de transports en commun, développement des pistes cyclables, véhicules électriques) participent à la réduction des flux de micropolluants en diminuant les émissions liées au trafic.

LE « DANGER » DES MOLÉCULES DE SUBSTITUTIONS

La substitution peut apparaître a priori séduisante en termes de coûts et d'efficacité, mais le caractère « moins dangereux » des nouvelles substances utilisées peut être difficile à établir et s'avérer incertain sur la durée. C'est le cas des parabènes qui sans avoir été interdits ont été remplacés dans de nombreux produits cosmétiques par le méthylisothiazolinone dont l'innocuité n'a jamais été questionnée.

36. Projet INOGEV : Innovations pour la Gestion durable de l'Eau en Ville (2010-2013). Projet ANR Villes durables 2009.

Les leviers d'action

NÉCESSITÉ D'UNE GESTION INTÉGRÉE

La réduction à la source des micropolluants concerne un très grand nombre de molécules mais aussi d'usagers et de pratiques. Elle nécessite donc une gestion intégrée et la responsabilisation de tous les acteurs : industriels, artisans, consommateurs, collectivités, institutions, scientifiques et décideurs politiques. Au sein des collectivités notamment, la lutte contre les micropolluants s'intègre dans une politique plus large de développement durable et se doit de rassembler les différents services des collectivités : transport, énergie, industrie, santé, agriculture, éducation, voirie, espaces verts, etc. Les résultats du programme ANR INOGEV³⁶ avaient montré en 2013 que les collectivités n'avaient pas encore développé de politique préventive de réduction des micropolluants dans les eaux pluviales urbaines, exception faite des herbicides et du plan « zérophyto ». Depuis, certains exemples voient le jour comme le plan « perturbateurs endocriniens » de la ville de Paris, le plan micropolluants de Bordeaux métropole ou encore la participation des collectivités dans de nombreux projets de l'appel à projets précité financés par l'Agence française pour la biodiversité et les Agences de l'eau.

LA RÉGLEMENTATION

L'un des principaux leviers d'action en termes de réduction de micropolluants (curatifs et préventifs) réside dans la réglementation. Depuis le début des années 2000, les différentes institutions ont lancé un certain nombre de programmes d'actions, plans nationaux ou des textes réglementaires visant la lutte contre les micropolluants (voir page 23).

En 2002, l'action nationale de recherche et réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE) voit le jour et vise à réduire les émissions ponctuelles de micropolluants, d'abord par les installations classées pour l'environnement (ICPE), puis par les STEU (dès 2010). **Elle comporte aujourd'hui une étape de diagnostic amont par les gestionnaires de réseaux dont l'objectif est l'amélioration des connaissances en vue d'une réduction des émissions de micropolluants** (note technique du 12 août 2016).

Le règlement REACH (registration, evaluation, authorization and restriction of chemicals) adopté en 2006 repose sur le principe de précaution. Il précise qu'**il incombe aux fabricants, importateurs et aux « utilisateurs en aval » de veiller à l'innocuité pour la santé humaine et l'environnement des substances fabriquées et mises sur le marché. Toutefois, de nombreuses exceptions et imprécisions limitent l'efficacité du dispositif**. Par exemple, la demande d'autorisation ne s'impose que pour les productions/importations supérieures à une tonne par an sauf exception (CMR, PBT, vBvP³⁷).

LES AIDES FINANCIÈRES

Des aides financières sont attribuées pour encourager les bonnes pratiques visant à réduire les émissions de micropolluants. Les Agences de l'eau, par exemple, aident à la mise en œuvre du plan zéro rejet par les artisans (bâtiment, imprimerie, mécanique...). L'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) subventionne les actions individuelles et collectives permettant de réduire à la source les pressions sur le milieu. Des aides sont ainsi attribuées pour la réalisation d'études (diagnostic de flux, recherche de micropolluants dans les eaux usées et eaux traitées des STEU, impact sur le milieu) ou la mise en place de technologies moins polluantes, voire de projets aboutissant à la substitution d'une substance dans le domaine industriel (jusqu'à 60 % de subvention). L'AESN subventionne par exemple la mise en place de dispositifs de désinfection vapeur dans les établissements de santé en remplacement de l'utilisation de produits biocides, notamment dans les zones de circulations et les chambres.

LA SENSIBILISATION/INFORMATION

Si la réglementation reste le levier principal en ce qui concerne les industriels, la sensibilisation et l'information des consommateurs et des collectivités est primordiale pour une attitude « écoresponsable ». Là encore, les collectivités ont un rôle majeur à jouer de par leur proximité avec leurs habitants. Différents modes de sensibilisation font actuellement l'objet d'expérimentations comme :

- la mise en place de zones test dans le projet LUMIEAU-Stra pour faire connaître les pratiques alternatives, informer sur la dangerosité des produits, les différentes voies de recyclage possibles,
- la diffusion de kits de sensibilisation sur les médicaments dans l'eau à destination des professionnels de santé et du grand public, comprenant notamment des « vidéos dessinées » (projet SIPIBEL-MEDIATES³⁸, 2015-2017),
- la mise à disposition de guides d'orientation à destination des acteurs impliqués dans la gestion des flux polluants transitant dans les eaux urbaines (guides à venir dans le cadre du Plan Micropolluants et des treize projets de l'appel à projets de l'Agence française pour la biodiversité et des Agences de l'eau),
- la synthèse et la traduction des résultats scientifiques vers les opérationnels du domaine de l'eau (ARCEAU-IdF, GRAIE, PIREN-Seine, Urbis...) pour une connaissance de la problématique et des enjeux de la gestion des micropolluants.

Une prise de conscience massive accompagnée de changements de pratiques collectifs pourraient constituer à terme un levier supplémentaire envers les producteurs/importateurs de micropolluants.

37. CMR : substances cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques. PBT : substances persistantes, bioaccumulables et toxiques. vBvP : substances very bioaccumulable, very persistant.

38. Projet d'animation territoriale et de sensibilisation à la problématique des médicaments dans l'eau développé en appui sur SIPIBEL en 2014.

Quelles précautions pour le suivi des micropolluants ?



Cl.

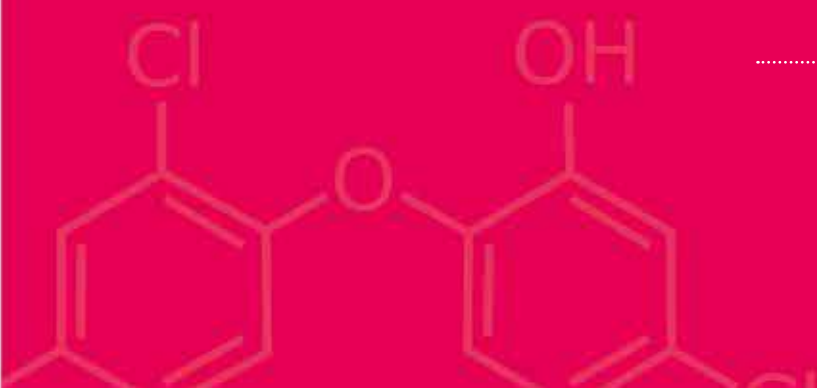
5



78 | Comment choisir les molécules à suivre ?

82 | Quelle stratégie opérationnelle pour le suivi des micropolluants ?

86 | Quelles sont les approches complémentaires (les outils biologiques, physiques) ?





Comment choisir les **molécules** à suivre ?

Essentiel

La difficulté concernant le choix des micropolluants à surveiller est de composer avec les polluants historiques, les polluants réglementaires, les polluants émergents, les produits de substitution, de dégradation et ceux qu'on ne connaît pas encore. D'une manière générale, **le choix des substances à suivre doit se faire en fonction** :

- des objectifs du suivi (identification de sources, études d'impact sur le milieu, évaluation d'efficacité des ouvrages...),
- du type d'échantillon considéré (eaux de surface, eaux urbaines, boues de STEU, dépôts, sédiments..) car les micropolluants susceptibles de s'y trouver ne sont pas forcément les mêmes pour tous,
- des sources potentielles de micropolluants présentes dans le bassin ou le réseau considéré,
- des possibilités analytiques,
- et du cadre réglementaire ou prospectif dans lequel s'inscrit le suivi.

Dans un contexte réglementaire, les micropolluants à suivre sont listés dans les textes (DCE, RSDE...). Dans une démarche prospective de recherche, le choix de micropolluants à suivre pourra s'appuyer sur ces listes réglementaires mais aussi sur celles établies dans le cadre de programmes de recherche scientifiques dans le domaine. Les listes de substances à surveiller sont régulièrement réévaluées par le comité d'expert priorisation en tenant compte des résultats des campagnes exploratoires.

Face au nombre considérable de substances potentiellement présentes dans les milieux, l'urgence est de définir celles à étudier ou à surveiller en priorité. Plus de 100 000 substances chimiques sont recensées en Europe³⁹. Comment se tenir à jour vis-à-vis des **micropolluants émergents** tandis que les **pollutions anciennes** (PCB, HAP...) ne sont toujours pas parfaitement caractérisées et encore moins maîtrisées ? A ceci s'ajoute la problématique des composés de substitution et de dégradation des micropolluants déjà suivis ou non. Mais aussi les questions sociétales qui peuvent orienter la recherche et le suivi des micropolluants (parabènes, désinfectants, nanoparticules, plastiques...). **Il apparaît alors nécessaire d'identifier et de hiérarchiser les substances à surveiller.**

Environ 900 micropolluants sont suivis dans les milieux aquatiques par les différentes institutions européennes et françaises (Agences de l'eau, Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), laboratoires de recherche...) dans le cadre des réseaux de surveillance réguliers ou exploratoires. Sur l'ensemble de ces micropolluants suivis, environ 200 sont réglementés, soit au travers des objectifs de qualité chimique et écologique du milieu récepteur soit dans le cadre de la qualité des rejets urbains (voir page 23). De nombreux autres micropolluants émergents (produits pharmaceutiques, détergents, biocides) sont intégrés à des programmes de surveillance et font l'objet d'exercices de priorisation.

39. Substances chimiques portant un numéro EINECS permettant d'identifier une substance chimique répertoriée dans l'inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes.

Prioriser en fonction du contexte et des objectifs

Le choix des molécules à suivre dépend essentiellement de l'objectif et du contexte du suivi. Le nombre et le type de micropolluants suivis seront extrêmement variables selon que l'on s'intéresse à :

- l'identification d'une source pour un micropolluant particulier,
- l'impact d'un type d'activité, de pratique, ou d'une agglomération sur la qualité des eaux,
- l'efficacité de procédés épuratoires d'ouvrages d'assainissement.

La pertinence du choix dépendra également de la matrice considérée (eaux de surface, eaux souterraines, eaux pluviales, eaux usées industrielles et/ou domestiques, rejets de stations

de traitement des eaux usées, boues, biote...). Le choix se basera également sur **le diagnostic des sources spécifiques** de micropolluants liées aux activités, aux types de surfaces et aux pratiques collectives et individuelles du bassin versant étudié (voir page 30).

En tout état de cause, la question des capacités analytiques mises en jeu est déterminante par rapport aux micropolluants et aux matrices surveillés.

Enfin, si l'on se place dans un cadre réglementaire, les micropolluants à suivre sont dictés par des listes officielles (DCE, RSDE..., voir page 23). En revanche, dans un contexte de recherche prospective ou d'anticipation, les différents acteurs de l'eau peuvent être amenés à rechercher ou étudier d'autres substances que celles figurant dans ces listes réglementaires. Dans ce cas, ils peuvent s'appuyer sur les listes de micropolluants sélectionnés dans les différents programmes de recherche (travaux d'Urbis, projet ANR AMPERES⁴⁰...). Ces différentes listes (Tableau 19) sont détaillées dans la suite du document et synthétisées en annexe.

Listes réglementaires								Listes programmes de recherche									
Milieu								Rejets		Boues		Eaux usées		Rejets STEU	Déversoirs d'orage	Eaux pluviales	
PSEE	SDP	SP	L1. 2006	WL	SPAS	S.CM	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	SIPIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)

Tableau 19 : Liste des micropolluants suivis réglementairement et dans les programmes de recherche. PSEE : polluants spécifiques de l'état écologique (arrêté du 7 août 2015) ; SDP : substances dangereuses prioritaires (DCE) ; SP : substances prioritaires (DCE) ; L1. 2006 : liste 1 de la directive de 2006 ; WL : watch list, liste de vigilance européenne (DCE) ; SPAS : substances pertinentes à surveiller (arrêté du 7 août 2015) ; S.C.M : substances complémentaires pour la métropole (arrêté du 7 août 2015) ; L.C.AESN : liste complémentaire de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (SDAGE 2016-2021) ; ICPE : liste de micropolluants pour les installations classées pour la protection de l'environnement (note du 27 avril 2011) ; STEU : listes de micropolluants pour les stations de traitement des eaux usées (note du 12 août 2016) ; Travaux d'Urbis 1 : Mailler, 2015 ; 2 : Gasperi et al., 2012 ; 3 : Zgheib, 2009 ; 4 : Becouze, 2010 ; 5 : Bressy, 2010 ; 6 : Sebastian, 2013 ; SIPIBEL : Lecomte (coord.), 2016 ; ARMISTIQ : Besnault et al., 2014 ; AMPERES : Choubert et al., 2011.

40. Projet AMPERES : Analyse de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et les Eaux Superficielles (2006-2009). Projet ANR-05-ECOT-0001.

Les micropolluants surveillés dans la réglementation

Dans de nombreux cas, pour les collectivités et les acteurs de l'eau, les textes réglementaires constituent le véritable moteur concernant le suivi de micropolluants.

LES EAUX DE SURFACE

Pour les eaux de surface, la directive cadre sur l'eau (DCE) encadre la liste des substances chimiques à surveiller pour atteindre le bon état des masses d'eaux.

Les substances prioritaires et dangereuses prioritaires

La DCE définit la liste des substances qui doivent faire l'objet d'un suivi dans les milieux aquatiques (eau, sédiments ou biote) afin d'en évaluer l'état chimique. Parmi celles-ci, 45 substances (annexe X de la DCE 2000/60/CE) sont dites prioritaires et dangereuses prioritaires (voir annexe).

Pour chacune d'entre elles, des normes de qualité environnementale (NQE) à ne pas dépasser ont été définies au niveau européen. La DCE fixe un objectif de réduction des émissions de substances prioritaires et de suppression des émissions de substances dangereuses prioritaires afin d'atteindre les objectifs de bon état.

Les substances de la liste 1 de la directive de 2006

En plus des micropolluants listés spécifiquement par la DCE, huit micropolluants figurant dans la liste 1 de la directive de 2006 participent à la caractérisation du bon état chimique des masses d'eaux (voir annexe).

Les polluants spécifiques de l'état écologique (PSEE)

La réglementation française définit d'autres micropolluants à surveiller pour évaluer le bon état écologique des masses d'eau. Initialement au nombre de neuf et actualisés à 31 (arrêté du 7 août 2015⁴¹), ils sont spécifiques à chaque grand bassin hydrographique (voir annexe). Dans le cas de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, vingt micropolluants de cette liste ont été jugés pertinents pour la surveillance et l'évaluation des milieux.

Liste de vigilance Européenne : Watchlist

En 2015, la Commission Européenne a imposé la surveillance de 17 nouvelles substances, listées dans la *directive n°2013/39/UE* (voir annexe) présentant potentiellement un risque significatif pour l'environnement aquatique et pour lesquelles les connaissances étaient insuffisantes. Chaque état membre doit ainsi procéder à des contrôles des eaux de surface dans des

zones représentatives pendant une période d'au moins douze mois (23 stations pour la France). En fonction des résultats du suivi, certains de ces micropolluants seront amenés à intégrer les listes des substances prioritaires et prioritaires dangereuses.

Liste de substances pertinentes à surveiller (SPAS)

La notion de « substances pertinentes à surveiller » permet d'étendre la surveillance au-delà des substances pour lesquelles des normes de qualité environnementale ont été définies. La liste des SPAS (arrêté du 7 août 2015⁴¹) est établie au niveau national pour la métropole et les départements d'outre-mer (DOM) (voir annexe). Elles ne sont pas utilisées pour évaluer l'état des eaux de surface mais pour préciser les niveaux de présence et de risque (transfert vers le milieu aquatique, toxicité...) associés à ces substances.

Selon les spécificités des bassins, certaines substances peuvent être ajoutées, ou au contraire, comme certains pesticides, « exclues » de la surveillance si les usages ne correspondent à aucune culture présente sur le bassin. Les résultats de ces campagnes de suivi peuvent amener à inclure de nouvelles substances dans la liste des PSEE.

Liste complémentaire de l'Agence de l'eau Seine-Normandie

Certaines Agences de l'eau comme l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) ont également établi une liste complémentaire de substances qui nécessitent l'acquisition de connaissances supplémentaires. Celle de l'AESN figure en annexe du SDAGE 2016-2021 et en annexe de ce document.

SURVEILLANCE DES MICROPOLLUANTS DANS LES REJETS URBAINS

L'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau (RSDE) a débuté en 2002, dans le cadre de la DCE. Elle est définie par la circulaire du 4 février 2002⁴² du ministère du Développement Durable. Elle a permis la constitution des listes de polluants à surveiller dans les rejets des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et des stations de traitement des eaux usées (STEU).

Liste de micropolluants pour les ICPE

La seconde phase de la RSDE, débutée en 2009⁴³ a permis l'élaboration de listes de substances à surveiller dans les rejets des ICPE en fonction du type d'activité concernée. Elle est encadrée par la note du 27 avril 2011⁴⁴. L'ensemble des substances concernées sont données en annexe de ce document.

41. Arrêté du 7 août 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement.

42. Circulaire du 4 février 2002 relative à l'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau pour les installations classées.

43. Circulaire du 5 janvier 2009 relative à la mise en œuvre de la deuxième phase de l'action nationale de la RSDE dans les rejets des ICPE soumises à autorisation.

44. Note du 27 avril 2011 relative aux adaptations des conditions de mise en œuvre de la circulaire du 5 janvier 2009 relative aux actions de recherche et de réduction des substances dangereuses dans les rejets aqueux des installations classées.

Liste de micropolluants pour les STEU

La troisième phase de l'action RSDE impose aux gestionnaires de STEU (de capacité nominale supérieure ou égale à 600 kg/j de DBO5, 10 000 équivalents-habitants), de réaliser des mesures de 96 micropolluants sur les eaux brutes et de 89 dans les eaux traitées (listés dans la note technique du 12 août 2016⁴⁵, voir annexe).

Listes de micropolluants issues de programmes de recherche

Les observatoires du réseau Urbis posent régulièrement la question du choix des substances à suivre. Certains travaux de thèses étudient jusqu'à une centaine de micropolluants, choisis pour leur pertinence au regard de la matrice étudiée (eaux pluviales, eaux usées, boues de STEU), des objectifs de l'étude, des contraintes réglementaires et des capacités analytiques disponibles.

La thèse de Romain Mailler (2015) a porté sur le suivi d'une soixantaine de micropolluants dans les eaux usées, les boues de STEU et les rejets de STEU de l'agglomération parisienne pour évaluer l'efficacité des différents procédés d'épuration. La thèse de Sally Zgheib (2009) a permis le suivi de 88 micropolluants dans les eaux pluviales mais aussi les eaux usées pour étudier l'influence de l'occupation des bassins versants sur les signatures des eaux urbaines. Les micropolluants étudiés dans le cadre de ces projets mais aussi des projets d'envergure de l'IRSTEA (AMPERES⁴⁶, ARMISTIQ⁴⁷) et SIPIBEL⁴⁸ sont présentés dans le tableau en annexe et sont classés par type de matrice. Ces listes « recherche » donnent une indication aux gestionnaires de l'eau des micropolluants qu'il peut être intéressant de suivre. Les tableaux 5, 6 et 7 (pages 37-39) offrent un aperçu des signatures en micropolluants des eaux pluviales, eaux usées et eaux unitaires des temps de pluie et peuvent ainsi aider à orienter le choix des substances à suivre.

Démarche proactive : priorisation, réévaluation des listes

Un réel effort des différents acteurs de l'eau ces dernières années a permis d'améliorer la surveillance des milieux en France. Cela passe par des campagnes exploratoires, des exercices de diagnostic et de priorisation qui permettent d'aboutir à des listes de substances pertinentes à surveiller.

L'objectif est de pouvoir prioriser et anticiper la surveillance des micropolluants émergents ou non réglementés, mais aussi de contribuer à la révision des listes existantes.

LE PLAN MICROPOLLUANTS (2016-2021)

Pour lutter contre la contamination des milieux aquatiques par les micropolluants, le ministère en charge de l'écologie a lancé le plan national Micropolluants entre 2010 et 2013, suivi par un second entre 2016 et 2021. Il s'agit d'un plan qui se veut fédérateur dont l'objectif est d'homogénéiser la surveillance des micropolluants dans les milieux aquatiques et de « **dresser des listes de micropolluants sur lesquels agir** ». Face au nombre considérable de substances potentiellement présentes dans les eaux, ces listes seront établies grâce à des **critères de priorisation dépendant du contexte et tenant compte des marges de manœuvre techniques, économiques et sociales**.

- Prioriser les substances pour lesquelles il manque des connaissances environnementales. Cela concerne le suivi des contaminants émergents déjà connus et l'identification de futurs contaminants d'intérêt pour le milieu aquatique.
- Prioriser les substances qui représentent un risque de non-atteinte du bon état et en fonction des objectifs environnementaux.
- Prioriser les substances selon la nécessité, la pertinence et la faisabilité de la réduction des émissions vers les milieux aquatiques.

LE COMITÉ D'EXPERTS PRIORISATION

Lors du premier plan micropolluant (2010-2013), une structure pérenne nommée « comité d'experts priorisation » (CEP) a été créée. **Son but est de remettre à jour et d'anticiper les listes de substances à surveiller en France.** La réévaluation des listes a lieu tous les six ans selon le rythme des cycles de la directive cadre sur l'eau (2010-2015, 2016-2021, 2022-2027). La procédure se déroule en trois étapes. La première consiste à évaluer la présence dans l'environnement des micropolluants issus d'une liste nationale à travers des campagnes exploratoires. Suite à cela, les experts scientifiques hiérarchisent les substances à enjeu et en tirent leurs recommandations pour les micropolluants pertinents à surveiller. Ces recommandations sont enfin évaluées par les acteurs de la politique de l'eau qui procèdent alors à la révision des listes en tenant compte des spécificités des territoires.

45. Note technique du 12 août 2016 : relative à la recherche de micropolluants dans les eaux brutes et dans les eaux usées traitées de stations de traitement des eaux usées et à leur réduction.

46. Le projet ANR-05-ECOT-0001 AMPERES (2006-2009) s'est attaché à mesurer une centaine de micropolluants en entrée et en sortie de 21 stations de traitement des eaux usées.

47. Le projet ARMISTIQ (2011-2014) s'est intéressé à 64 micropolluants dans les eaux usées et les boues de STEU pour évaluer l'efficacité des traitements tertiaires en STEU.

48. Le projet SIPIBEL (débuté en 2012) étudie une vingtaine de médicaments et détergents dans les eaux usées domestiques et hospitalières pour évaluer leur contribution aux flux arrivant en STEU.



Quelle stratégie opérationnelle pour le suivi des micropolluants ?

Essentiel

Afin d'obtenir des données représentatives et de bonne qualité, certaines précautions doivent être prises depuis le prélèvement jusqu'à la restitution des résultats par le laboratoire. Les objectifs, le contexte mais aussi les contraintes techniques (échantillonnage, conservation, homogénéisation) ou analytiques déterminent le choix du type d'échantillons (ponctuels ou moyens), des matrices à échantillonner, des volumes et des masses (pour l'analyse de la fraction particulaire) à prélever.

- L'étape de l'échantillonnage doit prévenir des risques de contaminations liées à l'environnement proche et au matériel utilisé pour le prélèvement et le flaconnage.
- A partir du prélèvement, il est recommandé de maintenir les échantillons au frais lors du transport et du stockage ($5 \pm 3^\circ\text{C}$, NFEN ISO 56-67-3).
- L'acheminement des échantillons vers le laboratoire d'analyse doit être réalisé le plus tôt possible et au plus tard 24h après le prélèvement afin que le laboratoire puisse prendre en charge les étapes de prétraitement qui assurent la conservation des échantillons avant analyses.
- Le cahier des charges adressé aux laboratoires prestataires (accrédités ou non) doit contenir un certain nombre de points incontournables. Par exemple, pour comprendre la dynamique et le devenir des micropolluants, il est indispensable de mesurer les concentrations dans les fractions dissoutes et particulaire. Ce qui n'est pas classiquement fait par les laboratoires d'analyses, même si ces techniques pour le particulaire sont utilisées en routine par les laboratoires de recherche. Une attention particulière doit être portée sur les limites de quantification proposées par les laboratoires qui doivent être pertinentes avec les objectifs du suivi. Enfin, des contrôles de qualité doivent être utilisés et précisés dans le rapport comme les blancs analytiques et terrain, l'analyse d'échantillons de référence lorsqu'ils existent.

L'objectif de cette question n'est pas de fournir un protocole opérationnel pour le prélèvement et l'analyse des micropolluants dans les eaux urbaines mais plutôt de mettre en lumière les précautions nécessaires pour obtenir des données fiables et pertinentes.

Quelles questions se poser avant de commencer ?

La qualité et la représentativité d'une mesure passe tout d'abord par l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage. Celle-ci est en grande partie conditionnée par les objectifs de l'étude. Une réflexion doit être menée sur plusieurs critères.

- Les substances à analyser (voir page 78) et les paramètres complémentaires à mesurer comme les concentrations en

matières en suspension (MES) ou le débit (calculs de flux, échantillonnage asservi au débit).

- Le type d'échantillon à prélever : échantillon ponctuel, moyen (pas de temps ou asservi au débit pour les échantillons aqueux), échantillon composite (reconstitué à partir de plusieurs prélèvements ponctuels pour les échantillons solides ; ex : chambres à sable, boues de STEU).
- Le pas de temps d'échantillonnage : il doit tenir compte du type d'émission des différents micropolluants. Pour des substances émises par intermittence, si la stratégie d'échantillonnage ne collecte pas les échantillons ou les sous-échantillons élémentaires avec un pas de temps suffisamment court, cela peut entraîner des biais importants dans l'estimation des concentrations et des flux.

- Les types de matrices échantillonnées : eaux (pluviales, usées ou eaux de surface), sédiments, matières en suspension, sols, biote. Ceci nécessite une bonne connaissance des propriétés des micropolluants recherchés et notamment de leur affinité pour les phases aqueuse et solide, leur volatilité, leur potentiel de bioaccumulation⁴⁹ (voir page 50).
- Les volumes d'eau et les masses de solides (sédiments, sols, matières en suspension...) à prélever pour respecter les besoins analytiques fixés par le laboratoire. Dans certains cas, ces besoins peuvent poser des contraintes opérationnelles.
- Le choix des prestataires : lorsque le suivi se fait dans un cadre réglementaire, les analyses doivent impérativement être réalisées par des laboratoires agréés⁵⁰. Ce n'est pas le cas en revanche si les analyses se font dans un cadre de recherche ou d'étude prospective. Certains laboratoires étant spécialisés dans des types d'analyses mais pas dans d'autres, il est parfois nécessaire de faire appel à plusieurs d'entre eux. Dans tous les cas, un cahier des charges doit être rédigé et adressé au laboratoire d'analyse afin de garantir la qualité des analyses.

Quelles précautions pour l'échantillonnage ?

Dans le cas où la réglementation n'impose pas que l'échantillonnage soit réalisé par un organisme accrédité, ou dans le cas d'une approche prospective, le maître d'ouvrage peut prendre en charge les prélèvements. Il doit alors respecter un certain nombre de précautions qui sont liées à la fois aux types de micropolluants à analyser mais aussi au contexte d'échantillonnage. **Il est préférable que le personnel en charge des prélèvements soit sensibilisé et formé aux précautions liées aux micropolluants.** Le laboratoire national de référence pour le suivi des milieux (AQUAREF) propose des guides techniques pour l'échantillonnage des sédiments, eaux souterraines, cours d'eau, plans d'eau, eaux marines et littoral, rejets d'assainissement collectif et industriel⁵¹. Ils traitent à chaque fois de la préparation et de la réalisation d'une campagne d'échantillonnage ; de la conservation des échantillons jusqu'au laboratoire d'analyses ; de la mise en œuvre des analyses et des exigences à mettre en œuvre en termes d'assurance qualité et de contrôles qualité.

La note RSDE du 12 août 2016⁵² précise également les prescriptions pour l'échantillonnage des eaux brutes et traitées de STEU. Les principaux points à respecter sont repris ci-dessous.

RISQUES DE CONTAMINATION EXTÉRIEURE DES ÉCHANTILLONS

Les conditions ambiantes sur le lieu de prélèvement peuvent avoir un impact sur la qualité de l'échantillon. D'une manière générale, toutes les substances se trouvant dans l'air ambiant sous forme de poussières, d'aérosols ou de gaz, et susceptibles de se déposer ou de se dissoudre dans l'échantillon, doivent être prises en considération et si possible neutralisées durant la durée de l'opération (ex : cigarette, pots d'échappement de véhicule, manipulation de solvants et autres produits chimiques volatils, produits de soin corporel, marqueurs...).

LE CHOIX DU MATÉRIEL D'ÉCHANTILLONNAGE ET DE FLACONNAGE

Le matériau du système d'échantillonnage doit être choisi en fonction de sa compatibilité avec les substances recherchées et doit garantir l'absence d'interférence physico-chimique (relargage, adsorption) avec les paramètres à mesurer. D'une manière générale, le flaconnage est fourni par le laboratoire d'analyse. Il est conseillé, pour l'analyse des métaux, d'utiliser un flaconnage en polypropylène, polyéthylène ou téflon car les flacons en verre sont susceptibles de relarguer des métaux. Au contraire pour l'analyse des micropolluants organiques, il est préférable d'éviter le plastique et de préférer le verre. En effet, le matériel d'échantillonnage (type tuyaux) et de stockage en plastique peut relarguer des polluants organiques (notamment des phtalates) et favoriser l'adsorption des substances hydrophobes sur les parois. Les composés volatils sont un cas particulier pour lesquels les pertes par dégazage doivent être évitées par un système de prélèvement adapté.

Remarque : dans tous les cas, il est important que le protocole soit validé pour chaque substance et chaque matrice (blanc matériel ou tests d'adsorption).

VOLUMES ET MASSES NÉCESSAIRES POUR LES ANALYSES

Le volume d'échantillon ainsi que la masse de solide (MES, sédiments...) doivent être en adéquation avec les besoins analytiques propres à chaque substance et à chaque laboratoire.

49. Une substance présentant un coefficient de partage carbone organique eau (Koc) supérieur à 500 sera ainsi recherchée de préférence dans le sédiment (cf. « TGD »-Technical Guidance Document- européen); un coefficient de partage n-octanol-eau (Kow) de log > 5 orientera vers une recherche dans le biote de préférence à l'eau (produit lipophile qui s'accumulent dans les graisses animales) (AESN-Aquascop, 2008).

50. Dans le cadre du suivi des eaux brutes et traitées des STEU (note du 12 août 2016), les analyses doivent être réalisées « par un ou des laboratoires titulaires de l'agrément prévu à l'arrêté du 27 octobre 2011 portant modalités d'agrément des laboratoires dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques au titre du code de l'environnement, dès lors que cet agrément existe ».

51. Site AQUAREF <http://www.aquaref.fr/guide-recommandations-techniques-aquaref>.

52. Relative à la recherche de micropolluants dans les eaux brutes et dans les eaux usées traitées de stations de traitement des eaux usées et à leur réduction.

Il est important de rappeler que pour l'étude des concentrations en phase particulaire les volumes nécessaires sont à adapter en fonction de la concentration en MES. Ainsi, si la quantité nécessaire pour l'analyse est de 100 mg de MES, le volume à prélever serait de 1 L pour des eaux usées à 100 mg de MES par litre et de 10 L pour une eau de rivière à 10 mg de MES par litre.

Remarque : dans un contexte de recherche ou d'études prospectives, si le volume échantillonné n'est pas compatible avec l'analyse de l'ensemble des contaminants, une stratégie « dégradée » consiste à limiter le nombre de substances suivies sur l'évènement considéré. Toutefois, dans la mesure du possible, le recours à cette stratégie « dégradée » ne doit pas se faire systématiquement au détriment de la même famille de polluants pour maintenir un équilibre entre les données acquises pour chacune d'entre elles.

CONSERVATION, CONDITIONNEMENT ET PRISE EN CHARGE DES ÉCHANTILLONS

Afin de limiter l'évolution des échantillons, les échantillons doivent être maintenus à température contrôlée ($5 \pm 3^\circ\text{C}$ selon la norme NF EN ISO 5667-3) pendant le prélèvement (échantillonneurs automatiques réfrigérés), le stockage et le transport. L'éventuel reconditionnement (sous échantillonnage ou reconstitution d'échantillons moyens) entraîne des risques d'erreurs et doit être fait selon les recommandations du laboratoire et des guides existants⁵².

Les échantillons doivent être acheminés au laboratoire dans un délai maximum de 24 heures suivant le prélèvement afin d'être prétraité le plus rapidement possible. Ce prétraitement (filtration, acidification ou extraction...), réalisé le jour même ou au maximum le lendemain de la réception, vise à stopper l'évolution de l'échantillon et dépend du paramètre à analyser (nature et spéciation). Pour tenir les délais de prétraitement, les laboratoires imposent souvent des créneaux de réception des échantillons dont il faut discuter préalablement avec eux.

Quelles précautions exiger des laboratoires d'analyse?

L'intention ici est d'attirer l'attention sur des notions importantes qui devraient figurer dans les cahiers des charges adressés aux laboratoires d'analyse pour s'assurer de la qualité d'un résultat.

ANALYSE DES FRACTIONS DISSOUTE ET PARTICULAIRE

La répartition d'un micropolluant entre les fractions dissoute et particulaire (voir page 50) s'avère être une information capitale pour :

- étudier son transfert vers les milieux aquatiques,
- comprendre son impact sur les organismes (toxicité élevée sous forme dissoute),

- orienter les modes de dépollution des eaux à mettre en œuvre : ouvrages de décantation, bio-filtration (voir page 62).

Il s'avère donc indispensable de caractériser les concentrations dans les phases dissoute et particulaire, en plus de l'information sur la concentration totale. En ce qui concerne les métaux, l'analyse peut se faire directement sur la fraction totale, particulaire ou dissoute. L'analyse de deux fractions permet de calculer la troisième. Pour les micropolluants organiques, la grande majorité des analyses se fait classiquement sur l'échantillon brut. Dans certains cas, l'échantillon est filtré et l'analyse ne porte que sur la fraction dissoute, la fraction particulaire étant rarement considérée. Pourtant, les études menées dans le cadre du réseau Urbis ont montré que l'analyse de l'échantillon brut peut sous-estimer les concentrations, en particulier pour les micropolluants organiques hydrophobes (fortement liés aux particules). Il est donc préférable d'analyser séparément les fractions dissoute et particulaire, et de calculer le total.

QUELQUES RÉSULTATS D'URBIS

L'analyse des HAP sur des échantillons bruts d'eaux usées (Zgheib, 2009) a conduit à une sous-estimation de l'ordre de 60 % de la concentration réelle (57 % pour une eau à 400 mg de MES/L et 66 % pour une eau à 70 mg/L).

Remarque : il est noté dans la réglementation visant le suivi des micropolluants en entrée et sortie de STEU (Note technique du 12 août 2016) que « pour les eaux ayant une concentration en MES supérieure ou égale à 250 mg/L, l'analyse devra être réalisée séparément sur la phase aqueuse et la phase particulaire ». Les chercheurs d'Urbis s'appuient plutôt sur une limite à 50 mg/L.

Attention : l'analyse de la fraction particulaire peut s'avérer difficile. Elle nécessite le prélèvement et la filtration d'importants volumes lorsque les échantillons sont faiblement chargés en MES. Dans certains cas, les méthodes analytiques ne sont pas développées dans les laboratoires accrédités pour la phase particulaire, mais le sont dans des laboratoires de recherche.

LES CONTRÔLES DE QUALITÉ

D'une manière générale, les protocoles d'analyses chimiques prévoient des contrôles de qualité pour s'assurer de la qualité de l'analyse. Dans le cas des micropolluants, ces précautions sont encore plus importantes étant données les très faibles concentrations recherchées (du ng/L au µg/L) et les nombreuses sources de contamination extérieures. Les contrôles qualité doivent jalonnier tout le processus de l'échantillonnage à l'analyse.

- Sur le terrain, des **blancs** doivent être réalisés **sur le matériel** d'échantillonnage **et de filtration** pour vérifier l'absence de contamination liée aux matériaux utilisés (flacons, tuyaux, système d'agitation) et de contaminations croisées avec les précédents prélèvements.

- Au laboratoire des **blancs analytiques** ainsi que des échantillons de référence **internes ou internationaux** doivent être analysés pour tester la sensibilité d'une méthode (rendements) ou d'un appareil.

Ces contrôles doivent être utilisés en fonction des objectifs de mesure, des propriétés des substances d'intérêt recherchées et des difficultés particulières liées à leur échantillonnage (risques de contamination, de dégradation de la substance à analyser, de perte par volatilisation...).

LIMITES DE QUANTIFICATION

Une attention particulière doit être portée aux limites de quantification (LQ) inhérentes aux différentes techniques analytiques. **Elles sont propres aux substances analysées, au type d'échantillon (eaux usées, eaux pluviales, eau de rivière, ou solide) et aux laboratoires.** Les limites de quantification sont un critère très important pour le choix du prestataire et pour l'interprétation des résultats. **En effet, une substance non quantifiée n'est pas nécessairement absente de l'échantillon.** La seule certitude est que si elle est présente, elle l'est à une concentration inférieure à la limite de quantification proposée par la méthode. Les LQ doivent être pertinentes au regard de l'objectif du suivi. En ce qui concerne les prélèvements dans le milieu, les LQ doivent forcément être inférieures aux NQE. Dans un contexte réglementaire, les laboratoires agréés se doivent de respecter les objectifs de LQ dictées par les textes. Dans la note technique du 12 août 2016, concernant les eaux usées brutes et traitées, les LQ sont indiquées.

LE CAHIER DES CHARGES

Enfin, le cahier des charges adressé au laboratoire d'analyses doit contenir l'ensemble des précautions précitées afin de garantir la fiabilité des résultats obtenus.

EXEMPLE D'UN CAHIER DES CHARGES TECHNIQUE

Dans le cadre des travaux d'OPUR, un cahier des charges a été rédigé pour définir les prescriptions techniques de l'analyse des phases particulaire et dissoute de 88 micropolluants dans des eaux usées et pluviales (Zgheib, 2009). Des extraits sont présentés ici à titre d'exemple.

Pour assurer la qualité des analyses, le laboratoire prestataire décrit dans un mémoire les éléments suivants :

- la méthodologie générale utilisée pour les analyses ;
- les procédures d'organisation visant à garantir la qualité de ces prestations (qualification du personnel) ;
- la description des procédures qualité mises en place (conservation des échantillons, validation des méthodes analytiques et des résultats) ;
- son expérience dans le domaine de l'analyse des substances polluantes (micropolluants organiques et métaux toxiques) ;
- les méthodes normalisées (NF, EN ou ISO) ou non, utilisées par substance ou famille de substances ;
- les méthodes d'analyses utilisées par le laboratoire doivent suivre en général les normes existantes au niveau français (AFNOR) ou international (ISO). Lorsqu'aucune méthode normalisée n'existe, le laboratoire met au point ses propres méthodes ; il devra cependant prouver l'efficacité de la méthode interne notamment via des essais inter-laboratoires ;
- les limites de détection (LD) et de quantification (LQ), les incertitudes, les rendements d'extraction (ou taux de récupération) dans le cas des polluants organiques. Ces éléments (méthode analytique et LQ) doivent être rappelés lors de la transmission des résultats ;
- le laboratoire précise aussi les critères de validation des analyses. Par exemple l'utilisation d'étalons internes et les modes de calculs de correction ;
- la liste des substances ou de familles de substances ne pouvant pas être analysées.

Si des substances, autres que celles mentionnées dans la liste initiale sont détectées au cours de l'analyse de l'échantillon, elles doivent obligatoirement faire l'objet d'une identification et, si possible, seront également quantifiées.

Conformément au cahier des charges, le rapport final comprenant les tableaux de résultats sur les phases dissoute et particulaire. Le rapport final présentera donc les remarques sur les conditions de réception des échantillons, l'aspect des échantillons, les tableaux renseignant les concentrations en µg/L et µg/g des substances et tout problème éventuellement rencontré lors des analyses.

Finalement, le devis devra au minimum comprendre le coût unitaire des analyses chimiques par échantillon et celui du rapport final ainsi que les délais avant transmission des résultats après réception des échantillons.



Quelles sont les **approches complémentaires** (les outils biologiques, physiques) ?

Essentiel

L'approche physico-chimique classique est basée sur des mesures ponctuelles de concentrations de micropolluants préalablement sélectionnés. Elle permet de caractériser les niveaux de contamination des milieux, de mesurer des abattements dans les ouvrages de traitement et de calculer des flux entre les différents compartiments. En revanche, elle présente certains verrous scientifiques ou pratiques qui nécessitent la combinaison d'outils complémentaires plus ou moins développés à l'heure actuelle.

- Les échantillonneurs passifs permettent d'intégrer les variations de concentrations des micropolluants dans le milieu dans lequel ils sont immergés et de détecter des niveaux de contamination parfois inférieurs aux limites de quantification (LQ) des méthodes analytiques classiques. Ils présentent également l'avantage de mesurer la fraction biodisponible des micropolluants pour les organismes vivants. C'est également le cas des disques chélatants pour l'analyse des métaux (basés sur la complexation des métaux sur le filtre).
- Les bioessais permettent de mesurer l'effet d'une ou de plusieurs substances envers des organismes vivants. Ils peuvent être utilisés en laboratoire ou *in situ* à la fois dans les milieux (cours d'eau, eaux souterraines, sédiments) ou à la sortie d'ouvrages d'épuration.
- Des outils de mesures en continu sont également utilisés ou en cours de développement pour permettre une gestion en temps réel des effluents urbains. La mesure de la turbidité en continu permet d'évaluer la dynamique des polluants particuliers dans les effluents bruts (moyennant un exercice de calibration préalable propre au site suivi). Des techniques reposant sur la mesure de la fluorescence des échantillons sont en cours de développement pour certains micropolluants (HAP).
- Enfin, des méthodologies d'analyse non ciblée ou « screening non ciblé » sont actuellement en développement. Leur objectif est de pouvoir analyser un échantillon sans a priori et dans son ensemble sans cibler au préalable une ou plusieurs substances.

L'approche classiquement utilisée pour la surveillance de la qualité chimique des eaux urbaines est basée sur des échantillonnages ponctuels ou moyens (24h) et l'analyse de substances préalablement sélectionnées. Cette approche permet d'évaluer les niveaux d'imprégnation des matrices environnementales, de les comparer si possible aux normes réglementaires et de pouvoir éventuellement remonter aux sources de contaminations. Mais cette approche physico-chimique présente également de nombreux verrous scientifiques.

Problématiques liées aux suivis classiques et enjeux des approches complémentaires

L'approche physico-chimique classique n'offre qu'une vision parcellaire de la problématique des micropolluants (Tableau 20).

- Elle ne permet pas de rendre compte finement de la variabilité temporelle de la contamination.
- Des concentrations très faibles des micropolluants ne sont pas toujours détectables.

- Elle ne renseigne pas sur la spéciation des contaminants (voir page 50) qui détermine pourtant l'impact des polluants sur les organismes vivants.
- Elle ne cible qu'une liste de polluants préalablement choisis (voir page 78) et ne permet pas de détecter ou d'évaluer ce qui n'est pas initialement recherché (exemple produits de dégradation, contaminants émergents, produits de substitution).
- Les mesures physico-chimiques ne permettent pas de mesurer les effets des micropolluants et notamment les effets synergiques (ou antagonistes) dus aux mélanges de micropolluants (effet « cocktail »).

Pour pallier ces différentes limites, des approches complémentaires basées sur des outils innovants sont utilisées ou en cours de développement. Parmi ces outils, on peut notamment citer :

- les mesures intégratives par des échantillonneurs passifs,
- les approches biologiques (bioessais) qui permettent de mesurer les effets des substances ou mélanges de substances sur des organismes vivants,
- les mesures en continu grâce à des sondes optiques (fluorescence, turbidité),
- les approches d'analyses non ciblées permettant une vision plus large des contaminants présents dans un échantillon.

Ces outils ne sont pas encore tous opérationnels mais leur expérimentation à petite échelle à travers différentes études de recherche et campagnes prospectives permet de consolider le cadre de leur utilisation.

L'étude de la spéciation des micropolluants et de leurs effets

La mesure d'une concentration totale d'un micropolluant est une information cruciale, notamment au regard des objectifs de qualité des milieux. Néanmoins, **cette mesure ne permet pas de prédire l'impact de sa présence sur les écosystèmes**. En effet, la fraction biodisponible (dissoute et non complexée) est susceptible d'impacter les premiers maillons de la chaîne trophique (voir page 50). C'est pourquoi de nombreuses études ont permis de développer des systèmes permettant de mesurer cette fraction dans le milieu.

LES ÉCHANTILLONNEURS INTÉGRATIFS, PASSIFS

Le terme « échantillonneurs passifs » rassemble de nombreux dispositifs aux caractéristiques variées. Immergés dans l'eau pendant une période donnée (quelques jours à un mois), ils permettent (sans apport d'énergie) de concentrer les micropolluants au niveau de leurs membranes (Figure 25). En intégrant la contamination dans le temps et en particulier les pics de pollution, ils assurent une meilleure représentativité de la variation temporelle de la contamination du milieu. Par ailleurs, la pré-concentration du micropolluant au sein de l'échantillonneur permet d'abaisser les niveaux de détection/quantification et d'observer des contaminations non détectables par les mesures ponctuelles. En outre, de par la petite taille de leurs pores, ces dispositifs permettent d'échantillonner la fraction dissoute d'un composé et d'approximer la fraction biodisponible pour les organismes aquatiques. Enfin, le piégeage du micropolluant *in situ* limite également les risques de contamination lors du prétraitement de l'échantillon (filtration, extraction...).

Caractéristiques de l'approche « classique »	Limites associées	Approches complémentaires
Mesures ponctuelles dans le temps	Concentrations inférieures aux limites de quantification	Echantillonneurs passifs
	Pas de représentativité de la variabilité temporelle des concentrations	Echantillonneurs passifs
		Suivi en continu
Recherche ciblée par substance	Manque de connaissances sur les substances émergentes, produits de dégradation...	Screening non ciblé
Mesures de concentrations totales	Pas de mesures de spéciation	Echantillonneur passifs
		Disques chélatants
Approche « chimie »	Pas de mesures des effets	Bioessais

Tableau 20 : Caractéristiques et limites de l'approche physico-chimique classique pour le suivi des micropolluants et approches complémentaires.



Figure 25 : Photo d'un échantillonneur passif de type membranes polymériques lors d'une calibration en laboratoire (source LEESU).

Leur configuration dépend du type de molécules ciblées (hydrophiles ou hydrophobes) et des conditions environnementales du milieu étudié (température de l'eau, conditions hydrodynamiques, charge particulaire).

Les échantillonneurs passifs les plus utilisés sont :

- les *Semi-permeable Membrane Devices* (SPMD) et les membranes polymériques (Figure 25) pour les polluants hydrophobes,
- les *Polar Organic Chemical Integrative Sampler* (POCIS), pour les polluants hydrophiles,
- les *Chemcatchers* pour les polluants hydrophobes, hydrophiles, métaux et organoétains,
- les *Diffusive Gradient in Thin Film* (DGT), utilisés depuis le milieu des années 1990 pour les métaux.

Limites et perspectives

- Chaque échantillonneur est spécifique d'un type de polluant (métaux, hydrophiles, hydrophobes...).
- Les résultats acquis avec des outils différents ne sont pas comparables entre eux.
- Une étape de calibration complexe, souvent sous-estimée par les utilisateurs, est indispensable. Elle est spécifique à chaque substance et doit être corrigée des conditions d'exposition. De ce fait, ces outils ne sont pas toujours facilement transférables au monde opérationnel.
- Le calcul d'un flux de polluants à partir des données obtenues nécessite l'évaluation des flux d'eau en contact avec les échantillonneurs pendant la période d'exposition.

LES DISQUES CHÉLATANTS (POUR LES MÉTAUX)

Ces disques se présentent sous la forme de disques filtrants. La méthode consiste à faire passer à travers le disque chélatant l'échantillon préalablement filtré. Le disque retient par complexation les métaux labiles et laisse passer les complexes métalliques inertes. La concentration en métal « inerte » est déterminée dans la solution de sortie. La concentration dissoute totale étant mesurée préalablement, la différence entre les deux permet de calculer la concentration des formes labiles (fraction biodisponible).

Ce principe et cet usage très simples sont compatibles, d'une part, avec un transfert vers le milieu opérationnel et, d'autre part, avec des mesures ponctuelles.

LES BIOESSAIS

L'approche analytique de la mesure des micropolluants se heurte à plusieurs limites/difficultés dont, la multiplicité des substances présentes dans les milieux et la non prise en compte des effets cumulatifs des différentes substances (synergiques ou antagonistes, effet « cocktail »). Or, les micropolluants sont définis par leurs faibles concentrations dans les eaux mais aussi et surtout par les effets biologiques qu'ils induisent sur les organismes. Les essais biologiques, ou bioessais, consistent à observer les effets d'une exposition à une ou plusieurs substances chimiques sur des fonctions biologiques d'organismes vivants ou d'une culture de cellules. Ainsi ils permettent de pallier les limites de l'approche classique et fournissent une mesure intégrative des effets nocifs des micropolluants sur les organismes vivants.

Il existe une grande variété de bioessais qui reposent sur une multiplicité d'organismes cibles (cellules, levures, bactéries, algues, organismes juvéniles, poissons, amphibiens...) et d'effets (perturbation endocrinienne, toxicité générale, géotoxicité). Il peut s'agir de tests en laboratoire (conditions contrôlées) sur des cellules *in vitro*, *in vivo*, avec des matrices synthétiques ou environnementales, ou de tests *in situ* sur la faune et la flore.

Les bioessais peuvent être utilisés de manière complémentaire à la mesure chimique. Cette logique se retrouve dans les approches « d'analyses dirigées par l'effet » (*Effect Directed Analysis* ou EDA) qui orientent les analyses chimiques en fonction des résultats issus des bioessais de manière à cibler *in fine* les polluants responsables des effets néfastes révélés par les bioessais.

La mesure biologique sur des organismes vivants est une information communicante et qui possède une vertu pédagogique pour les non-experts de l'eau. Il est intéressant de noter qu'ils sont maintenant utilisés par les acteurs publics (collectivités territoriales, Agences de l'eau, services de l'État) ou privés (traiteurs d'eau, industriels pour leurs rejets) pour disposer d'un outil d'analyse, de suivi et d'autocontrôle de leurs installations ou de leurs impacts sur le milieu.

Limites et perspectives

De nouveaux outils ont été intégrés pour le deuxième cycle de la DCE :

- l'évolution de l'Indice invertébré IBGN à l'indice invertébré multimétrique I2M2 traduit la volonté de disposer de bio-indicateurs mieux corrélés aux pressions et notamment chimiques (HAP, pesticides, micropolluants minéraux, micropolluants organiques),
- la mesure sur le biote donne des informations sur la biodisponibilité des substances mais aussi sur les mécanismes de bioamplification et bioaccumulation mais sans en mesurer les effets.

Cependant, le lien entre pression chimique et perturbation des milieux aquatiques doit être mieux évalué. Le Centre de Recherche de l'Union européenne (Joint Research Center) indique dans son rapport de 2014 (*Carvalho et al., 2014*) que l'intégration des bioessais dans les programmes de surveillance est aujourd'hui une nécessité pour combler le fossé entre les approches chimique et écologique. Or la multiplicité des bioessais et leur relative nouveauté rend difficile leur intégration dans la réglementation. Ainsi, des réflexions sont en cours tant au niveau européen que national pour intégrer l'utilisation des bioessais dans l'évaluation de l'état des eaux dans le cadre de la DCE. En outre, des tests normés AFNOR sont disponibles pour évaluer les effets des perturbateurs endocriniens sur les amphibiens et poissons.

Les mesures en continu par méthode optique

L'une des principales difficultés dans l'évaluation des flux de polluants dans le milieu urbain est due à la variabilité temporelle des concentrations dans les différentes matrices, les campagnes de mesure se révélant en effet souvent peu représentatives de la réalité. C'est pourquoi les approches de mesures en continu « optiques » ont été étudiées au sein d'Urbis.

SUIVI DE LA TURBIDITÉ

Il a été démontré que, dans les effluents bruts, les micropolluants métalliques ainsi qu'un certain nombre de micropolluants organiques sont majoritairement présents sous forme particulaire. Des études ont montré la possibilité d'utiliser des mesures de turbidité pour évaluer indirectement la dynamique de la pollution particulaire associée aux matières en suspension (MES, *Versini et al., 2015*). La mesure en continu de la turbidité permet une gestion en temps réel des réseaux d'assainissement.

Limites et perspectives

Les relations entre turbidité et MES dépendent des sites, des événements pluvieux et des sondes utilisées. **C'est pourquoi une calibration doit être systématiquement réalisée pour établir la relation entre MES et turbidité.** L'échantillonnage de cinq événements (compatible avec les pratiques des gestionnaires) pour établir la relation MES/turbidité suffit pour obtenir des incertitudes de l'ordre de $\pm 15\%$ pour les flux annuels de MES (contre 50 % en utilisant juste ces cinq valeurs ponctuelles). Il est également apparu pertinent d'utiliser deux sondes pour s'assurer d'une fiabilité du signal brut.

SUIVI DE LA FLUORESCENCE [UV 3D]

Certaines molécules possèdent des particularités physico-chimiques appelées fluorophores. Lorsqu'elles sont excitées à certaines longueurs d'ondes, elles réémettent la lumière à une longueur d'onde supérieure spécifique. Les techniques récentes de spectrofluorimétrie sont capables de balayer rapidement un large spectre de longueurs d'onde en excitation et en émission permettant l'acquisition d'un spectre en trois dimensions (3D, excitation/émission/intensité, Figure 26) caractéristique de chaque échantillon. À l'aide de méthodes de traitement du signal, il est alors possible de caractériser et de quantifier certaines espèces fluorescentes en présence, comme les HAP. L'avantage de cette méthode optique, par rapport aux analyses classiques, est qu'elle est peu coûteuse et non destructive, et comme pour la mesure de turbidité, elle peut être utilisée en continu grâce à des sondes avec fibre optique.

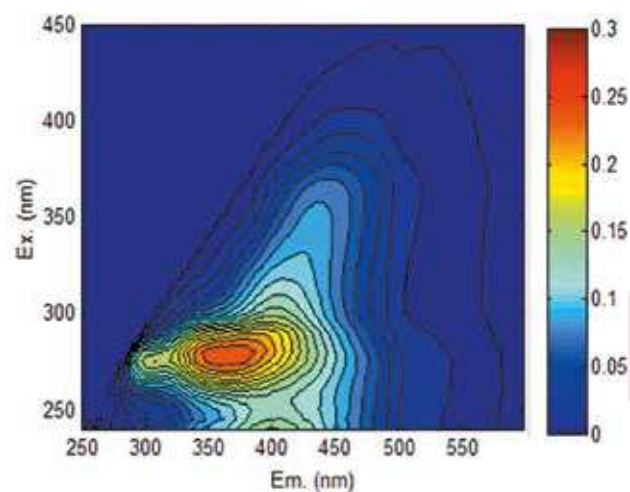


Figure 26 : Spectre de fluorescence 3D d'un échantillon d'eau usée, normalisé au carbone organique dissous. Longueurs d'ondes d'émission (en abscisse) et d'excitation (en ordonnées). Les couleurs représentent l'intensité de la fluorescence (exprimée ici en unité Raman L/mgC, source LEESU)

Limites et perspectives

Cette approche est encore en développement et pourrait permettre, à terme, de suivre en continu la qualité des effluents urbains. Des essais de suivi de la dynamique des HAP dans les eaux de ruissellement de voirie pendant un évènement pluvieux ont d'ores et déjà été réalisés (projet Trafipollu). Comme pour la turbidité, la calibration est sans doute « site-dépendante » et devra tenir compte des effets d'interférence avec d'autres substances comportant des fluorophores (ex : la matière organique).

Analyse non ciblée (screening non ciblé)

Habituellement, les micropolluants sont suivis de façon ciblée en fonction des réglementations, préoccupations de santé publique et des avancées des techniques analytiques. Ainsi, même si certaines méthodes permettent l'analyse de plusieurs centaines de molécules à la fois, c'est finalement peu par rapport au nombre de substances autorisées et utilisées, et donc susceptibles d'être retrouvées dans les milieux aquatiques. La recherche non ciblée vise à caractériser la contamination en micropolluants d'un échantillon sans cibler une ou plusieurs familles de substances mais en regardant l'échantillon dans son ensemble. Elle s'appuie sur des outils analytiques permettant d'obtenir la masse moléculaire exacte de tous les composés détectés (spectrométrie de masse haute résolution, Figure 27). Si la présence d'une molécule est observée dans plusieurs échantillons ou sur plusieurs sites, des investigations supplémentaires sont menées afin d'identifier sa structure moléculaire.

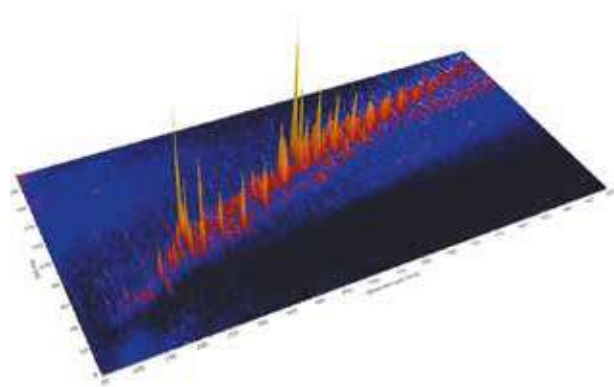


Figure 27 : Chromatogramme 3D d'un échantillon environnemental obtenu en spectrométrie de masse haute résolution (UPLC-QTOF). Masse (en abscisse) et temps de dérive (en ordonnée) des composés (source LEESU).

Limites et perspectives

Les limites de cette méthode résident dans l'identification des composés inconnus qui peut se révéler extrêmement longue mais aussi dans la préparation de l'échantillon et dans la méthode d'analyse elle-même qui se doivent d'être les plus exhaustives possibles.



Références bibliographiques

- **AESN-Aquascop, 2008.** *Guide des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie*, 276 pages.
- **Becouze-Lareure C., 2010.** *Caractérisation et estimation des flux de substances prioritaires dans les rejets urbains par temps de pluie sur deux bassins versants expérimentaux*. Thèse de doctorat, INSA-Lyon, laboratoire DEEP, 298 pages.
- **Becouze-Lareure C., Dembélé A., Coquery M., Cren-Olivé C., Barillon B. et Bertrand-Krajewski J.-L., 2015.** *Source characterization and loads of metals and pesticides in urban wet weather discharges*. Urban Water Journal, 13(6) : pages 600-617.
- **Bressy A., 2010.** *Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines : effets de différents modes de gestion à l'amont*. Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 332 pages.
- **Briand C., Gateuille D., Gasperi J., Moreau-Guigon E., Alliot F., Chevreuil M., Blanchard M., Teil M.-J., Brignon J.-M., Labadie P., Budzinski H., Rocher V., Azimi S., Thevenot D., Moilleron R., Meybeck M. et Mouchel J.-M., 2016.** *Bilans et flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine*. Rapport PIREN-Seine, 26 pages.
- **Cantuarias-Villessuzanne C. et Mombelli E., 2015.** *Analyse économique de stratégies de gestion à long terme des micropolluants urbains*. Rapport final INERIS thème 16, action C.3, 75 pages.
- **Carvalho R.-N., Arukwe A., Ait-Aissa S., Bado-Nilles A., Balzamo S., Baun A., Belkin S., Blaha L., Brion F., Conti D., Creusot N., Essig Y., Ferrero V.-E., Flander-Putrlé V., Fürhacker M., Grillari-Voglauer R., Hogstrand C., Jonáš A., Kharlyngdoh J.-B., Loos R., Lundebye A.-K., Modig C., Olsson P.-E., Pillai S., Polak N., Potalivo M., Sanchez W., Schifferli A., Schirmer K., Sforzini S., Stürzenbaum S.-R., Sjøteland L., Turk V., Viarengo A., Werner I., Yagur-Kroll S., Zouneková R. et Lettieri T., 2014.** *Mixtures of chemical pollutants at European legislation safety concentrations: how safe are they?* Toxicol Sci ; 141(1) : pages 218-33.
- **Chocat B., 2014.** *Nos médicaments peuvent-ils être dangereux ?* GRAIE, Méli-Mélo, 10 pages.
- **Choubert J.-M., Martin-Ruel S., Budzinski H., Miège C., Esperanza M., Soulier C., Lagarrigue C. et Coquery M., 2011.** *Évaluer le rendement des stations d'épuration. Apports méthodologiques et résultats pour les micropolluants en filières conventionnelles et avancées*. TSM, n°1/2 : pages 44-62.
- **Cladière M., 2012.** *Sources, transfert et devenir des alkylphénols et du bisphénol A dans le bassin amont de la Seine : cas de la région Ile-de-France*. Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 253 pages.
- **Deshayes S., 2015.** *Identification des sources de phtalates et d'alkylphénols (polluants émergents) en milieu urbain et compréhension des processus d'élimination*. Thèse de doctorat, LEESU et LCPC, Université Paris-Est, 252 pages.
- **De Gouvello B. (coord.), Berthier E., Chauveau J., Gromaire M.-C., Lamprea K., Nohra Y., Ramier D., Seidl M. et Versini P.-A., 2014.** *TVGEP : Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines*. Rapport final, projet RGPU appel à projet C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable) 2009, 316 pages.
- **DGALN et Cerema, 2014.** *Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0 : rejets d'eaux pluviales. Principes généraux de gestion des eaux pluviales*. Fiche instructeur n°1, 16 pages.
- **El-Mufleh A., 2011.** *Répartition des micropolluants métalliques et organiques au sein de la matrice solide des sédiments issus de l'assainissement des eaux pluviales urbaines. Comparaisons et critiques de méthodes de fractionnement*. Thèse de doctorat, IFSTTAR - Nantes, 231 pages.

- **Ferro Y., 2013.** *Evaluation de l'impact des rejets urbains de temps de pluie sur le compartiment algal des écosystèmes aquatiques. Mise au point d'outils pour la surveillance des milieux récepteurs.* Thèse de doctorat, LEHNA, ENTPE, 253 pages.
- **Flanagan K., Deshayes S., Saad M., Caupos E., Boudahmane L., Partibane C., Dubois P., Meffray L., Branchu P. et Gromaire M-C., 2017.** *Water quality performance of road runoff biofilters: retention of particulate and dissolved phase micropollutants.* Présentation à l'« international conference of urban drainage » (ICUD).
- **Gasperi J., Cladière M., Zgheib S., Rocher V., Moilleron R. et Chebbo G. 2012.** *Substances prioritaires dans les rejets urbains de temps de pluie : cas du déversoir de Clichy.* TSM n°4 : pages 30-43.
- **Gasperi J., Mirande C., Chebbo G., Moilleron R., Saad M., Dubois P., Caupos E., Gromaire M-C., Ruban V., Delamain M., Demare D., Percot S., Cren C., Wiest L., Fratta C., Sebastian C., Barraud S., Millet M., Diallo Kessoo M., Schwartz J-J. et Wolff H., 2013.** *Micropolluants dans les eaux pluviales urbaines : concentrations, flux et contributions atmosphériques. Résultats des campagnes de mesure sur trois bassins versants.* Rapport final de sous-tâche, projet INOGEV, 41 pages.
- **Gromaire M-C., 1998.** *La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire. Caractéristiques et origines.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 580 pages.
- **Gromaire M-C., Aires N. et Lehoucq C., 2016.** *Contrôle à la source des eaux pluviales.* Présentation au colloque « Micropolluants présents dans les milieux aquatiques et leur impact sur la santé humaine. Exemple de l'agglomération parisienne », ARCEAU-IdF/Académie de l'eau, 28 pages.
- **Gromaire M-C., Veiga L., Grimaldi M. et Aires N., 2014.** *Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines. Document d'orientation pour une meilleure maîtrise des pollutions dès l'origine du ruissellement.* Agence de l'eau Seine-Normandie, 63 pages.
- **Gosset A., 2018.** *Evaluation écotoxicologique des Rejets Urbains par Temps de Pluie (RUTP) : Développement d'une batterie de bioessais et application à la création de biocapteurs.* Thèse de doctorat en cours, LEHNA, ENTPE.
- **Hannouche A., Chebbo G., Joannis C., Gasperi J., Gromaire M-C., Moilleron R., Barraud S. et Ruban V., 2017.** *Stochastic evaluation of annual micropollutant loads and their uncertainties in separate storm sewers.* Environmental Science and Pollution Research International 24 (36) : 28205-19.
- **Lamprea K., 2009.** *Caractérisation et origine des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs péri-urbains.* Thèse de doctorat, IFSTTAR - Nantes, 264 pages.
- **Lamprea K., Mirande-Bret C., Bressy A., Caupos E. et Gromaire M-C., 2017.** *Evaluation du potentiel d'émission d'alkylphénols et de bisphénol A par lessivage des matériaux de construction, des pièces et des consommables automobiles.* TSM n°7/8 : pages 71-90.
- **Lecomte V. (coord.), 2016.** *Résultats de quatre années de suivi, d'études et de recherches sur le site pilote de Bellecombe.* Rapport du projet SIPIBEL, 174 pages.
- **Legret M., 2001.** *Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées.* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 109 pages.
- **Les Cahiers Eau Service, 2011.** *Micropolluants de quoi parle-t-on ? Comment les traiter ?* Supplément technique du magazine eau service n°34, 8 pages.
- **Mailler R., 2015.** *Devenir des micropolluants prioritaires et émergents dans les filières conventionnelles de traitement des eaux résiduaires urbaines (files eau et boues), et au cours du traitement tertiaire par charbon actif.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 373 pages.
- **Marmonier P., Maazouzi C., Foulquier A., Navel S., François C., Hervant F., Mermillod-Blondin F., Vieney A., Barraud S., Togola A. et Piscart C., 2013.** *The use of crustaceans as sentinel organisms to evaluate groundwater ecological quality.* Ecological Engineering, vol 57 : pages 118-132.

- **Masoud F. S., 2014.** *Modélisation de l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 186 pages.
- **Moilleron R., 2004.** *Hydrocarbures et métaux en milieu urbain.* Mémoire HDR, 79 pages.
- **Moilleron R., 2016.** *Les micropolluants dans les systèmes urbains. De quels polluants parle-t-on ?* Présentation au colloque « Micropolluants présents dans les milieux aquatiques et leur impact sur la santé humaine. Exemple de l'agglomération parisienne », ARCEAU-IdF/Académie de l'eau, 69 pages.
- **Molle P., Fournel J., Meyer D., Troesch S., Clément F., Brelot E., Bacot L., Guillermand S., De Brito C., Toussaint J-Y., Vareilles S., Ah Leung S., Lipeme Kouyi G., Bichet Q., Chocat B et Esser D., 2013.** *Systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie.* Programme de recherche ANR SEGTEUP, 42 pages.
- **Pétavy F., 2013.** *Rapport Gestion des sédiments.* Rapport final de sous-tâche, projet INOGEV, 41 pages.
- **Petrucchi G., Gromaire M-C. et Chebbo G., 2014.** *Analyse des sources primaires diffuses de métaux et HAP et modélisation des flux annuels émis dans les eaux de ruissellement.* Rapport final de sous-tâche, projet INOGEV, 75 pages.
- **Pham H., Gasperi J., Moncaut P. et Branchu P., 2014.** *Efficacité épuratoire des stations de dépollution des eaux pluviales. Elimination des alkylphénols et du bisphénol A véhiculés par les eaux pluviales par filtre planté de roseaux.* Rapport OPUR, 31 pages.
- **Pouzol T., 2018.** *Monitoring and modelling of pharmaceuticals in wastewater - Daily and hourly loads in both hospital and urban wastewater.* Thèse de doctorat, INSA-Lyon, laboratoire DEEP, 304 pages.
- **Robert-Sainte P., 2009.** *Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 416 pages.
- **Sage J., 2016.** *Concevoir et optimiser la gestion hydrologique du ruissellement pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 370 pages.
- **Scholes L., Revitt M., Gasperi J. et Donner E., 2008.** *Priority pollutant behaviour in stormwater best management practices (BMPs).* Projet ScorePP, 59 pages.
- **Sebastian C., 2013.** *Bassin de retenue des eaux pluviales en milieu urbain : performance en matière de piégeage des micropolluants.* Thèse de doctorat, INSA-Lyon, DEEP, 355 pages.
- **Soares C., 2016.** *Influence de la matière organique dissoute d'origine urbaine sur la spéciation des micropolluants : de la station d'épuration au milieu récepteur.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 299 pages.
- **Stachel B., Holthuis J-U., Schulz W., Seitz W., Weber W.H., Tegge K.-T. et Dobner I., 2010.** *Treatment Techniques and Analysis of Stormwater Run-off from Roads in Hamburg, Germany,* in: Fatta-Kassinos, D., Bester, K., Kümmerer, K. (Eds.), *Xenobiotics in the Urban Water Cycle.* Springer Netherlands, Dordrecht : pages 445–461.
- **Tedoldi D., 2017.** *Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 256 pages.
- **Van De Voorde A., 2012.** *Incidence des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement : cas des traitements par produits biocides.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 277 pages.
- **Versini P-A., Joannis C. et Chebbo G., 2015.** *Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement.* Guides et protocoles, ONEMA, 78 pages.
- **Wicke D., Matzinger A. et Rouault P., 2015.** *Relevanz organischer Supurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins.* Rapport en allemand sur le projet OGRE, 109 pages.
- **Zedek S., 2016.** *Dynamique de polluants émergents (parabènes, triclosan et triclocarban) dans le continuum eaux grises - milieu récepteur.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 244 pages.
- **Zgheib S., 2009.** *Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire.* Thèse de doctorat, LEESU, Université Paris-Est, 349 pages.

Pour aller plus loin

QUELQUES PROJETS SUR LES MICROPOLLUANTS

- **ADEPTE** : Aide au Dimensionnement pour la gestion des Eaux Pluviales par Traitement Extensif. <http://www.adepte-pluvial.org/>
- **AMPERES** : Analyse des micropolluants prioritaires et émergents dans les rejets et les eaux de surface. Projet ANR : PRogramme ECotechnologies et Développement Durable (PRECODD) - 2005. <http://projetampere.cemagref.fr/>
- **ARMISTIQ** : Amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques : <https://armistiq.irstea.fr/presentation-du-projet/>
- **INOGEV** : Innovations pour la Gestion durable de l'Eau en Ville (INOGEV) - Connaissance et maîtrise de la contamination des eaux pluviales urbaines. Projet ANR : Villes durables - 2009. <https://www.leesu.fr/Presentation-de-l-ANR-INOGEV> et <https://inogedep2013.sciencesconf.org/resource/page/id/5>
- **SIPIBEL** : Site pilote de Bellecombe, sur les effluents hospitaliers et stations d'épurations urbaines. <http://www.graie.org/Sipibel/index.html>
- **Trafipollu** : Modélisation multi-échelles de la pollution due au trafic dans un environnement urbain. Projet ANR : Villes et Bâtiments Durables (VBD) - 2012. <https://sites.google.com/site/trafipollu/home>
- **TVGEP** : Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales urbaines. Concevoir et Construire pour le Développement Durable (C2D2), Appel à projets 2009. <https://www.leesu.fr/Presentation-de-TVGEP>

QUELQUES OUVRAGES COMPLÉMENTAIRES

- **AESN-Ineris, 2018**. Guide pratique des micropolluants dans les eaux du bassin Seine-Normandie, 383 pages.
- **Fascicule PIREN-Seine, 2009**. La micropollution dans le bassin de la Seine. Maîtriser l'impact des molécules créées par l'homme, 68 pages.
- **Fascicule PIREN-Seine, 2017**. Les micropolluants dans le bassin de la Seine. Alkylphénols, bisphénol A, résidus pharmaceutiques et composés perfluoroalkylés, 76 pages.

QUELQUES SITES WEB IMPORTANTS

- **Légifrance** : <https://www.legifrance.gouv.fr/>
- **AIDA** : la réglementation de la prévention des risques et de la protection de l'environnement : <https://aida.ineris.fr/>
- **Le plan micropolluants 2016-2021** : <http://www.onema.fr/lancement-du-plan-de-lutte-contre-les-micropolluants-2016-2021>
- **Les treize projets de l'appel à projets « Innovations et changements de pratiques** : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » (Agence française pour la biodiversité, Agences de l'eau et le ministère de la Transition écologique et solidaire) : <http://www.onema.fr/AAP-micropolluants-eaux-urbaines>
- **Les guides et recommandations AQUAREF** : <http://www.aquaref.fr/>

Glossaire

- **ADSORPTION** : phénomène physique ou chimique par lequel des atomes, des ions ou des molécules se fixent sur une surface solide depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide. Cette interaction fait intervenir des forces plus ou moins solides (Van der Waals, liaisons ioniques ou covalentes). C'est le cas de l'adsorption de micropolluants, tels que les métaux lourds, sur les particules solides se trouvant dans le milieu ou de l'adsorption de composés indésirables sur du charbon actif dans les procédés de traitement de l'eau.
- **AÉROBIE*** : adjectif qualifiant une transformation chimique ou biochimique se produisant en présence d'oxygène, ou un organisme vivant qui a besoin d'oxygène gazeux libre pour vivre (...).
- **ANAÉROBIE** : adjectif qualifiant une transformation chimique ou biochimique se produisant en l'absence d'oxygène, ou un organisme vivant qui n'a pas besoin d'oxygène gazeux libre pour vivre.
- **ASSIMILATION** : désigne en biologie le processus par lequel des substances et des matériaux extérieurs à un organisme sont transformés en substances et matériaux intérieurs à l'organisme.
- **BIOACCUMULATION*** : phénomène de concentration de certaines substances dans l'organisme des êtres vivants (...). Ce phénomène se rencontre à tous les niveaux de la chaîne trophique.
- **BIOAMPLIFICATION** : phénomène d'augmentation des teneurs de certaines substances observées dans les tissus des différentes espèces au fur et à mesure que l'on s'élève dans la chaîne alimentaire.
- **BIODÉGRADATION*** : dégradation de la matière organique par l'ensemble des microorganismes présents dans l'eau et en premier lieu les bactéries qui y puisent l'énergie et les substances nécessaires à leur croissance et à leur métabolisme.
- **BIOTE** : ensemble des organismes vivants présents dans un habitat, un lieu ou une région précise.
- **BOUES URBAINES OU BOUES D'ÉPURATION** : sédiments résiduels produits par une station de traitement des eaux usées à partir des effluents liquides lors des traitements primaires et secondaires. Elles sont surtout constituées de bactéries mortes et de matière organique minéralisée.
- **COLLOÏDES*** : les colloïdes sont constitués de microparticules ou de macromolécules qui sont suffisamment petites pour participer au mouvement brownien, mais suffisamment grandes pour servir de support à des molécules de dimensions plus faibles. Ces dernières sont alors adsorbées en surface et ne se trouvent plus dans l'eau sous forme de molécules libres. Les dimensions des colloïdes peuvent varier de quelques nanomètres à quelques micromètres (...).
- **DÉVERSOIR D'ORAGE*** : ouvrage permettant le rejet direct d'une partie des effluents au milieu naturel lorsque le débit à l'amont dépasse une certaine valeur. Les déversoirs d'orage sont généralement installés sur les réseaux unitaires dans le but de limiter les apports au réseau aval et en particulier dans la station d'épuration en cas de pluie.
- **DISQUES CHÉLATANTS** : disques filtrants permettant de retenir par complexation les métaux labiles d'un échantillon d'eau.
- **EAUX DE RUISSELLEMENT** : eaux issues des précipitations atmosphériques qui s'écoulent sur une surface pour atteindre le réseau d'assainissement ou un milieu récepteur aquatique.
- **EAUX GRISES** : également appelées eaux ménagères, désignent l'ensemble des eaux usées produites par les activités domestiques à l'exclusion des eaux vannes. Elles sont principalement constituées des eaux de bains et de douches, de cuisine et plus particulièrement de celles rejetées par les lave-vaisselle, lave-linge...
- **EAUX PLUVIALES** : désigne les eaux transitant par temps de pluie dans le réseau d'assainissement pluvial strict. Ses caractéristiques peuvent être différentes de celles des eaux de ruissellement à cause de mauvais branchements dans les réseaux (mélanges avec les eaux usées) et des phénomènes de dépôts/érosion de polluants dans le réseau.

- **EAUX UNITAIRES** : effluents circulant dans les réseaux unitaires.
- **EAUX UNITAIRES DE TEMPS DE PLUIE** : eaux circulant dans les réseaux unitaires par temps de pluie. Il s'agit d'un mélange d'eaux usées et d'eaux de ruissellement dont une partie est envoyée vers la STEU et l'autre est directement rejetée au milieu via les déversoirs d'orage.
- **EAUX USÉES*** : eaux ayant été utilisées par l'homme (...). On distingue généralement les eaux usées d'origine domestique et les eaux usées d'origine industrielle.
- **EAUX VANNES** : également appelées eaux noires, elles désignent les eaux usées provenant des sanitaires d'un foyer.
- **ÉCOSYSTÉMIQUE** : concept relatif aux écosystèmes. Avantage que l'homme retire des écosystèmes. Certains services écosystémiques sont des avantages matériels liés à des processus naturels tels que l'autoépuration des eaux, la stabilisation des sols ou la pollinisation ; d'autres sont des avantages immatériels, comme des activités récréatives ou culturelles.
- **ÉCOTOXICOLOGIE** : branche de la toxicologie qui étudie les effets directs et indirects des polluants sur l'environnement. L'écotoxicologie étudie notamment le transfert des polluants dans les biotopes, ainsi que leurs transformations et leurs effets sur les organismes vivants et sur les processus écologiques fondamentaux.
- **EFFET COCKTAIL** : effet sur la santé ou les écosystèmes causé par la conjonction de plusieurs substances chimiques auxquelles les organismes sont simultanément exposés. Cette définition suggère que des molécules prises séparément peuvent voir leur toxicité augmenter en les combinant.
- **ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES** : composés métalliques naturellement présents en quantité variable dans les sols ou les eaux, dont certains sont indispensables aux organismes qui y vivent.
- **ÉQUIVALENT-HABITANT** : unité de mesure basée sur la quantité de polluant produite en un jour par une personne et rejetée dans les eaux usées.
- **FLUX** : quantité de micropolluants véhiculés par un type d'effluent. On calcule un flux en multipliant une concentration par un débit.
- **FRACTION BIODISPONIBLE** : désigne la fraction d'une substance ayant la possibilité d'être absorbée et d'être utilisée par le métabolisme d'un organisme vivant.
- **HECTARE ACTIF** : correspond à la surface (en hectare) qui contribue au ruissellement.
- **HYDROCYCLONAGE** : désigne un procédé de séparation de matériaux dont les applications très variées permettant notamment une classification granulométrique. Elle repose sur l'injection tangentielle, sous pression, d'un mélange de solides et d'un liquide dans la partie cylindrique de l'hydrocyclone. C'est la force centrifuge appliquée à ce mélange qui induit une séparation entre les particules.
- **HYDROCYCLONE*** : appareil de lavage des boues destiné à séparer les matières organiques et les matières minérales.
- **HYDROLYSE** : réaction chimique dans laquelle une liaison covalente est rompue par action d'une molécule d'eau.
- **HYDROPHILE** : composé ayant une affinité pour l'eau et tendance à s'y dissoudre ou qui l'absorbe.
- **HYDROPHOBE** : composé chimique n'ayant pas la capacité de créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau.
- **K_d** : constante de sorption, elle dépend du type de matières en suspension (microorganismes ou particules inertes), des caractéristiques physico-chimiques de la substance (hydrophile, hydrophobe...) et du type de sorption (absorption hydrophobe ou adsorption électrostatique).
- **K_H** : la constante de Henry est la valeur adimensionnelle du rapport des concentrations d'une substance dans les phases liquide et gazeuse.
- **LESSIVAGE** : transport de substances par l'eau de pluie ruisselant sur les surfaces.

- **LOG K_{ow} (ou LOG P)** : mesure l'hydrophobicité d'une substance. K_{ow} représente le rapport des concentrations du composé à saturation et à l'équilibre dans l'octanol et dans l'eau. Ainsi, plus les molécules ont un K_{ow} élevé, plus elles sont apolaires et peu solubles dans l'eau.
- **MATRICE** : terme utilisé ici pour désigner un compartiment environnemental (sédiment, eau, biote) ou urbain (eaux usées, eaux de ruissellement, boues de STEU...).
- **MÉTABOLITE** : composé stable produit par la transformation biochimique d'une molécule initiale, par le métabolisme au sein d'une cellule, d'un tissu ou du milieu sanguin.
- **MICROPOLLUANTS ÉMERGENTS** : le terme « micropolluant émergent » désigne les substances que l'on trouve dans l'environnement au fur et à mesure de l'amélioration de la surveillance et des techniques analytiques dont les impacts environnementaux et/ou sanitaires sont encore mal identifiés, et pour lesquels peu, voire aucune réglementation spécifique n'est mise en place.
- **MILIEU RÉCÉPTEUR** : milieu naturel recevant les eaux, épurées ou non, restituées par les systèmes d'assainissement (rivière, lac, étang, fossé, eaux souterraines, sols...).
- **NORME DE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE ou NQE** : concentration d'un micropolluant (ou d'un groupe de micropolluants) définie pour l'eau, les sédiments ou le biote et qui ne doit pas être dépassée, afin de protéger la santé humaine et l'environnement. Les normes de qualité environnementale sont définies dans le contexte réglementaire de la directive cadre sur l'eau, ou DCE (2000/60/EC).
- **ORGANISME MODÈLE** : espèce de référence étudiée de manière approfondie pour comprendre un phénomène biologique particulier, en supposant que les résultats de ces expériences seront partiellement valables pour la connaissance d'autres organismes.
- **PERTURBATEUR ENDOCRINIEN** : substance chimique d'origine naturelle ou artificielle étrangère à l'organisme qui peut interférer avec le fonctionnement du système endocrinien et induire ainsi des effets délétères sur cet organisme ou sur ses descendants.
- **PHASE PARTICULAIRE/PHASE DISSOUE** : état dans lequel un élément chimique peut être retrouvé dans un liquide, sous forme de particule, ou dissout au sein du liquide.
- **PHOTODÉGRADATION** : dégradation d'une molécule photodégradable causée par l'absorption de photons, en particulier ceux émis par le soleil et correspondant aux rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge.
- **PLUIES COURANTES** : événements pluvieux de faible intensité et de période de retour courte (correspondant au niveau de service N1, inférieure à 6 mois). Ses caractéristiques (période de retour, volume) dépendent de la pluviométrie locale.
- **REJETS URBAINS DE TEMPS DE PLUIE *** : eau et polluants rejetés au milieu naturel par une agglomération (...) qui représentent l'ensemble des rejets urbains dus aux exutoires pluviaux, aux déversoirs d'orage et à la station d'épuration pendant les périodes pluvieuses.
- **RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES** : ensemble des apports (secs et humides) provenant de l'atmosphère et déposés sur les surfaces.
- **SOBRIÉTÉ ÉCOLOGIQUE** : concept qui prône l'utilisation de moins de produits de synthèse, notamment dans les cosmétiques.
- **SPÉCIATION** : ensemble des formes chimiques ou structurales que peut prendre un composé chimique.
- **SPECTROFLUORIMÉTRIE (ou SPECTROSCOPIE DE FLUORESCENCE)** : désigne un type de spectroscopie électromagnétique qui analyse la fluorescence d'un échantillon. Elle implique l'utilisation d'un rayon de lumière (habituellement dans l'ultraviolet) qui excite les électrons des molécules de certains composés et les fait émettre de la lumière de plus basse énergie.
- **SURFACTANT OU TENSIOACTIF** : composé modifiant la tension superficielle entre deux surfaces. Les agents mouillants sont un exemple de surfactant.

- **SURVERSES UNITAIRES DE TEMPS DE PLUIE** : désigne la partie des eaux unitaires de temps de pluie rejetées au milieu via les déversoirs d'orage.
- **TEMPS DE DEMI-VIE ($T_{1/2}$ VIE)** : désigne le temps nécessaire pour que la quantité ou la concentration initiale d'un composé soit divisée par deux.
- **TOXICITÉ*** : aptitude d'un produit à menacer l'équilibre, voire la survie d'une espèce vivante (animale ou végétale).
- **TOXICOLOGIE*** : science dont l'objet est l'étude des modalités de contamination de l'environnement par les agents polluants naturels ou artificiels ainsi qu'à leurs mécanismes d'action et leurs effets sur l'ensemble des êtres vivants qui peuplent la biosphère.
- **TRANSPORT COLLOÏDAL** : désigne le transport de micropolluants adsorbés sur des colloïdes. De par leur très faible dimension, une certaine part des colloïdes peuvent s'infiltrer dans les sols.
- **UBUIQUISTE** : se dit d'une substance présente dans un grand nombre d'échantillons, de milieux étudiés du fait notamment de son caractère persistant.
- **VECTEURS** : terme employé ici pour désigner les effluents (eaux usées, eaux pluviales, rejets unitaires de temps de pluie) et les retombées atmosphériques qui véhiculent des micropolluants.
- **XÉNOBIOTIQUE** : substance présente dans un organisme vivant mais qui lui est étrangère ; elle n'est ni produite par l'organisme lui-même, ni apportée par son alimentation naturelle.

* Définitions issues de l'Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, *Bernard Chocat et al.*, 1997. Paris, Lavoisier, 1124 pages.

Annexes

Liste des micropolluants suivis réglementairement et dans les programmes de recherche

En orange : uniquement les micropolluants suivis dans les programmes de recherche.

EU : eaux usées, DO : déversoirs d'orage, EP : eaux pluviales

- **PSEE** : polluants spécifiques de l'état écologique (arrêté du 7 août 2015)
- **SDP** : substances dangereuses prioritaires (DCE)
- **SP** : substances prioritaires (DCE)
- **L1. 2006** : liste 1 de la directive de 2006
- **WL** : watch list, liste de vigilance européenne (DCE)
- **SPAS** : substances pertinentes à surveiller (arrêté du 7 août 2015)
- **S.C.M** : substances complémentaires pour la métropole (arrêté du 7 août 2015)
- **L.C.AESN** : liste complémentaire de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (SDAGE 2016-2021)
- **ICPE** : liste de micropolluants pour les installations classées pour la protection de l'environnement (note du 27 avril 2011)
- **STEU** : liste de micropolluants pour les stations de traitement des eaux usées (note du 12 août 2016)
- **Urbis**
 - 1 : Mailler, 2015 ;
 - 2 : Gasperi et al., 2012 ;
 - 3 : Zgheib, 2009 ;
 - 4 : Becouze, 2010 ;
 - 5 : Bressy, 2010 ;
 - 6 : Sebastian, 2013 ;
- **SIPIBEL** : Lecomte (coord.), 2016
- **ARMISTIQ** : Besnault et al., 2014
- **AMPERES** : Choubert et al., 2011.

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires								Listes programmes de recherche										
		Milieu						Rejets		Boues		EU		Rejets STEU	DO	EP				
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis (1)	ARMISTIQ	Urbis (1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIPIBEL	Urbis (1)	Urbis (2)	Urbis (2,3,5,6)
1,1,1-trichloroéthane	COV								X	X										
1,1,2,2-tétrachloroéthane	COV							X		X										
1,1,2-trichloroéthane	COV							X		X										
1,1-dichloroéthane	COV								X	X										
1,1-dichloroéthène	COV								X											
1,1-dichloroéthylène	COV									X										
1,2-cis-dichloroéthylène	COV								X											
1,2-dibromoéthane	COV							X												
1,2-dichloroéthane	COV			X						X	X			X	X					X
1,2-dichloroéthylène	COV									X										
17α-estradiol	Produits pharmaceutiques												X					X		
17α-éthinyloestradiol EE2	Produits pharmaceutiques					X							X							
17β-estradiol E2	Produits pharmaceutiques					X							X					X		
1-chloro-2-nitrobenzène	Chlorobenzènes									X										
1-chloro-3-nitrobenzène	Chlorobenzènes									X										
1-chloro-4-nitrobenzène	Chlorobenzènes									X										
1-hydroxy Ibuprofen	Produits pharmaceutiques							X	X											
2-(3-trifluorométhylphenoxy)nicotinamide	Pesticides						X													
2,1-benzo-naphthothiophène	HAP															X				
2,4,5-trichlorophénol	Chlorophénols								X	X										
2,4,6-tribromophénol	Bromophénols														X					
2,4,6-trichlorophénol	Chlorophénols								X	X										
2,4-D	Pesticides	X									X			X						X
2,4'-DDT	Pesticides													X					X	X
DDT	Pesticides					X									X					
2,4-dibromophénol	Bromophénols														X					
2,4-dichlorophénol	Chlorophénols								X	X										
2,4-dinitrotoluène	Explosifs							X												
2,4-MCPA	Pesticides	X									X									X
2,6-dichlorobenzamide	Pesticides								X											
2,6-dinitrotoluène	Explosifs							X												
2,6-di-tert-butyl-4-méthylphénol	Additif alimentaire					X			X											
2-bromophénol	Bromophénols														X					
2-chlorophénol	Chlorophénols								X	X										
2-chlorotoluène	Chlorotoluènes									X										
2-hydroxy-deséthyl atrazine	Pesticides							X												
2-méthylphénol	Phénols							X												
3,4-dichloroaniline	Anilines							X		X										
3-chlorophénol	Chlorophénols								X	X										
3-chloroprène	COV									X										
3-chlorotoluène	Chlorotoluènes									X										
4,4'-DDT	Pesticides													X					X	X
4-chloro-2-nitroalaine	Colorants									X										
4-chloro-3-méthylphénol	Chlorophénols								X	X				X					X	X
4-chlorophénol	Chlorophénols							X	X	X		X								
4-chlorotoluène	Chlorotoluènes									X										
4-méthoxy cinnamate de 2-éthylhexyle	Cosmétiques					X			X											
4-méthylphénol	Phénols							X												
4-sec-butyl-2,6-di-tert butylphénol	Alkylphénols								X											
4-tert-butylphénol	Alkylphénols									X			X	X	X	X			X	X
Acénaphène	HAP								X	X			X	X		X			X	X
Acénaphthylène	HAP												X	X		X			X	

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires							Listes programmes de recherche											
		Milieu							Rejets		Boues	EU			Rejets STEU	DO	EP			
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	IOPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Bisphénol A	Bisphénols						X	X				X		X				X		X
Bisphénol S	Bisphénols							X	X											
Bore	Métaux												X	X	X					X
Boscalid	Pesticides	X								X										
Bromoxynile	Pesticides							X												
Bromure de méthyle Bromométhane	COV							X												
Butyle benzyle phtalate BBP	Phtalates							X	X											
Butylparabène	Cosmétiques													X						
Cadmium et ses composés	Métaux		X						X	X	X	X	X	X	X				X	X
Carbamazépine	Pesticides						X	X							X	X		X		
Carbamazépine époxyde	Pesticides						X													
Carbendazime	Pesticides						X	X												X
Carboxybuprofène	Produits pharmaceutiques							X												
Chlordécone	Pesticides	X									X									
Chlorfenvinphos	Pesticides			X					X					X	X				X	X
Chloridazone	Pesticides							X												
Chloroalcanes C10-C13	Chloroalcanes		X						X	X			X	X					X	X
Chloroanilines	Anilines								X											
Chlorobenzène	COV							X	X											
Chloroéthylène (chlorure de vinyle)	COV							X	X											
Chloronèbe	Pesticides							X												
Chlorophénols	Chlorophénols								X											
Chloroprène	COV								X											X
Chlorothalonil	Pesticides																			X
Chlorprophame	Pesticides	X								X										
Chlorpyrifos	Pesticides			X					X					X	X				X	X
Chlortétracycline	Produits pharmaceutiques																	X		
Chlortoluron	Pesticides	X								X										X
Chrome et ses composés	Métaux	X							X		X	X	X	X	X				X	X
Chrysène	HAP							X					X						X	X
Chrysène + triphénylène	HAP											X			X					
Ciprofloxacine	Produits pharmaceutiques																X			
Clarithromycine	Produits pharmaceutiques					X														
Clindamycine	Produits pharmaceutiques														X					
Clomazone	Pesticides							X												
Clothianidine	Pesticides					X														
Clotianidin	Pesticides							X												
Cobalt	Métaux							X	X	X			X	X	X					X
Composés du tributylétain	Organoétains		X																	
Coronène	HAP							X												
Cuivre	Métaux	X								X	X	X	X	X	X				X	X
Cuivre et ses composés	Métaux	X								X										
Cyanures libres	Autres					X														
Cybutryne	Pesticides			X						X										
Cyclophosphamide	Produits pharmaceutiques							X												
Cypemethrine	Pesticides			X						X										
Cyproconazole	Pesticides							X												
Cyprodinil	Pesticides	X								X										
Cyprofloxacine	Produits pharmaceutiques																	X		
Danofloxacine	Produits pharmaceutiques																	X		
Décabromodiphényléther	PBDE								X	X			X	X					X	X
Deltaméthrine	Pesticides						X	X												

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires						Listes programmes de recherche												
		Milieu						Rejets		Boues		EU		Rejets STEU	DO	EP				
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIPIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Déséthyl atrazine	Pesticides							X					X						X	X
Déséthyl simazine	Pesticides												X						X	X
Di(2-ethylhexyl) phtalate (DEHP)	Phtalates		X						X	X	X	X	X	X					X	X
Diazepam	Produits pharmaceutiques														X					
Dibenzo[a,h]anthracène	HAP												X						X	X
Dibenzo[a,h-a,c]anthracène	HAP												X		X					
Dibenzothiophène	HAP												X		X					
Dibutylétain	Organoétains							X	X	X	X		X	X					X	X
Dibutylphtalate (DBP)	Phtalates						X	X				X								
Dicamba	Pesticides							X												
Dichlorobenzènes	Chlorobenzènes								X											
Dichloroéthane	CHOV							X					X							
Dichlorométhane	CHOV			X					X	X			X	X					X	X
Dichlorophénol	Chlorophénols								X					X						
Dichlorvos	Pesticides			X						X										
Diclofénac	Produits pharmaceutiques					X	X								X	X	X			
Dicofol	Pesticides		X							X										
Dicyclanil	Produits pharmaceutiques																	X		
Dieldrine	Pesticides				X									X	X				X	X
Diéthyl phtalate (DEP)	Phtalates						X	X												
Difloxacin	Produits pharmaceutiques																	X		
Diflufenicanil	Produits pharmaceutiques	X								X										X
Diisobutyl phtalate (DIBP)	Phtalates						X	X												
Diisononyl phthalate (DINP)	Phtalates							X												
Dimétachlore	Pesticides							X												
Dimethenamide	Pesticides							X												
Diméthoate	Pesticides							X												
Diméthyl phtalate (DMP)	Phtalates							X	X											
Di-n-butylphtalate (DnBP)	Phtalates						X													
Dioxines et composés	Dioxines		X																	
Diphényléthers bromés	PBDE		X																	
Diuron	Pesticides			X					X	X			X	X	X		X	X	X	X
Econazole	Produits pharmaceutiques															X	X			
EDTA	Autres							X												
Endosulfan	Pesticides		X						X				X	X					X	X
Endrine	Pesticides				X								X	X					X	X
Enrofloxacin	Produits pharmaceutiques																	X		
Epichlorhydrine	Autres							X	X											
Epoxyconazole	Pesticides							X	X											X
Erythromycine	Produits pharmaceutiques					X		X							X			X		
Estriol	Produits pharmaceutiques												X					X		
Estrone	Produits pharmaceutiques					X		X					X					X		
Etain	Métaux							X						X	X	X				
Ethofumesale	pesticides							X												
Ethyl2-Hexyl Phtalate	Phtalates							X												
Ethylbenzène	BTEX							X	X	X			X						X	X
Ethylparabène	Cosmétiques						X						X							
Ethynyl estradiol	Produits pharmaceutiques															X				
Fénofibrate	Produits pharmaceutiques																	X		
Fenpropidine	Pesticides						X	X												X
Fer	Métaux							X					X	X	X					
Florfenicol	Produits pharmaceutiques																	X		

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires							Listes programmes de recherche											
		Milieu							Rejets		Boues		EU			Rejets STEU	DO	EP		
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIPIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Flufenacet	Pesticides							X												
Flumioxazine	Pesticides							X												
Fluochloridone	Pesticides							X												
Fluoranthène	HAP			X					X	X	X	X	X	X	X			X	X	
Fluorène	HAP							X			X	X	X		X			X	X	
Fluroxyppyr	Pesticides							X												
Fluvoxamine	Produits pharmaceutiques																	X		
Folpel	Pesticides																			X
Furosémide	Produits pharmaceutiques							X										X		
Galaxolide	Produits pharmaceutiques										X	X								
Gestodène	Produits pharmaceutiques																	X		
Glufosinate	Pesticides																			
Glyphosate	Pesticides	X								X				X	X	X			X	X
Glyphosate ammonium	Pesticides																			X
Heptabromdiphényléther	PBDE		X							X										
Heptachlore (dont époxyde)	Pesticides		X							X										
Hexabromocyclododécanes (HBCDD)	Nouveaux retardateurs de flamme		X							X										
Hexabromodiphényléther	PBDE		X							X					X					
Hexachlorobenzène	Chlorobenzènes		X						X	X			X	X				X	X	
Hexachlorobutadiène	COV		X						X	X			X	X				X	X	
Hexachlorocyclohexane	Pesticides		X						X				X	X						X
Hexachlorocyclohexane - α	Pesticides												X							X
Hexachlorocyclohexane - γ (Lindane)	Pesticides												X							X
Hexachlorocyclohexane - δ	Pesticides																			
Hexachlorocyclohexane - β	Pesticides																			X
Hexachloroéthane	COV								X											
Hexachlorohexane (total)	Pesticides		X						X											
Hexachloropentadiène	COV								X		X									
Hexachlorophène	Cosmétiques							X												
Ibuprofène	Produits pharmaceutiques						X									X	X			
Imidaclopride	Pesticides	X			X					X										
Indeno (1,2,3-cd) pyrène	HAP		X						X		X	X	X	X				X	X	
Iprodione	Pesticides	X								X										X
Irgarol 1051	Pesticides																			X
Isobutylparabène	Cosmétiques												X							
Isodrine	Pesticides				X								X	X				X	X	
Isopropylbenzène	BTEX								X				X					X	X	
Isoproturon	Pesticides			X					X	X			X	X	X		X	X	X	
Isoquinoline	Autres							X												
Isothiazolinone et ses dérivés	Cosmétiques							X												
Isoxaflutole	Pesticides						X													
Kétoprofène	Produits pharmaceutiques					X		X								X		X		
Lénacile	Pesticides						X													
Lévonorgestrol	Produits pharmaceutiques																	X		
Lincomycine	Produits pharmaceutiques														X					
Linuron	Pesticides	X					X													
Lithium	Métaux						X						X	X						
Lorazépam	psychotrop																	X		
Malathion	pesticides						X													
Mancozebe	Pesticides							X												
Manganèse	Métaux					X		X			X	X								X
Marbofloxacin	Produits pharmaceutiques																	X		

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires								Listes programmes de recherche										
		Milieu							Rejets		Boues		EU		Rejets STEU	DO	EP			
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIPIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Mécoprop-p (MCP)	Pesticides							X												X
Méfénoxam	Pesticides							X												
Mepiquat-chlorure	Pesticides							X												
Mercaptodiméthur	Pesticides						X													
Mercur et ses composés	Métaux		X						X	X	X	X	X	X					X	X
Méropénem	Produits pharmaceutiques															X				
Mesosulfuron-methyl	Pesticides							X												
Métaldéhyde	Pesticides	X								X			X						X	X
Métazachlore	Pesticides	X								X										X
Métazachlore ESA	Pesticides							X												
Métazachlore OXA	Pesticides							X												
Metformine	Produits pharmaceutiques					X		X												
Methazole	Pesticides						X													
Méthiocarbe	Pesticides				X															
Méthyl tert-butyl ether	COV						X													
Méthyl-2-Naphtalène	HAP							X												
Méthylparabène	Cosmétiques					X							X							
Méthyl-pyrimiphos	Pesticides						X													
Métolachlore	Pesticides					X		X												
Métolachlore ESA	Pesticides					X														X
Métolachlore OXA	Pesticides					X														
Métopropol	Produits pharmaceutiques														X					
Métronidazole	Produits pharmaceutiques							X										X		
Metsulfuron-méthyl	Pesticides							X												
Molybdène	Métaux						X	X					X	X	X					X
Monensine	Produits pharmaceutiques																	X		
Monobutylétain	Organoétains							X	X	X	X		X	X					X	X
Monochlorophénol	Chlorophénols													X						
Myclobutanil	Pesticides																			X
Naphtalène	HAP		X						X	X		X	X	X	X				X	X
Napropamide	Pesticides							X												
Naproxène	Produits pharmaceutiques																	X		
Narasine	Produits pharmaceutiques																	X		
N-butylbenzènesulfonamide	Autres							X												
Nickel et ses composés	Métaux			X					X	X	X	X	X	X	X				X	X
Nicosulfuron	Pesticides	X								X										
Nitrobenzène	Autres						X													
Nonylphénols (4-NP)	Alkylphénols		X						X	X	X	X	X	X	X				X	X
Nonylphénol-di-éthoxylé (NP2EO)	Alkylphénols éthoxylés							X		X	X	X	X	X	X					X
Nonylphénol-mono-éthoxylé (NP1EO)	Alkylphénols éthoxylés							X		X	X	X	X	X	X					X
Nonylphénol-1-carboxylé (NP1EC)	Alkylphénols carboxylés													X						X
Norethindrone	Produits pharmaceutiques																	X		
Norfloxacine	Produits pharmaceutiques																	X		
Octabromodiphényléther	PBDE								X				X	X					X	X
Octocrylène	Cosmétiques							X												
Octylphénol (4-n-OP)	Alkylphénols												X						X	X
Octylphénol (4-tert-OP)	Alkylphénols			X				X	X		X	X	X	X	X				X	X
Octylphénol-mono-éthoxylé (OP1EO)	Alkylphénols éthoxylates							X		X	X		X							X
Octylphénol-di-éthoxylé (OP2EO)	Alkylphénols éthoxylates							X		X	X		X							X
O-Demethyltramadol	Produits pharmaceutiques							X												
Ofloxacine	Produits pharmaceutiques					X												X		
Ométhoate	Pesticides						X													

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires								Listes programmes de recherche										
		Milieu						Rejets		Boues		EU		Rejets STEU	DO	EP				
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIPIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Orbifloxacin	Produits pharmaceutiques																	X		
Oxadiazon	Pesticides	X				X					X									
Oxazepam	Produits pharmaceutiques						X	X										X		
Oxytétracycline	Produits pharmaceutiques																	X		
Paracétamol	Produits pharmaceutiques						X										X			
PBDE-205	PBDE											X								
PBDE-209	PBDE											X								
PBDE : -47, -99, -100, -209	PBDE													X						
PBDE : -28, -47, -99, -100, -153, -154, -183, -205, -209	PBDE																			X
PBDE : -7, -15, -17, -28, -47, -49+71, -66, -71, -85, -99, -100, -153, -154, -183, -206, -207, -208, -209	PBDE												X							
PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)	PCB								X	X	X	X	X						X	X
PCB 194	PCB													X					X	X
PCB-28,	PCB													X						
Pendiméthaline	Pesticides	X								X										X
Pénicilline	Produits pharmaceutiques																	X		
Pentabromodiphényléther	PBDE		X						X				X	X					X	X
Pentachlorobenzène	Chlorobenzènes		X						X	X			X	X					X	X
Pentachlorophénol	Chlorophénols			X					X	X		X	X	X					X	X
Perchlorate	Autres						X	X												
Pérylène	HAP												X							
Phénanthrène	HAP							X				X	X		X				X	X
Phosphate de tributyle	Pesticides	X																		
Piclorame	Pesticides							X												
Pipéronyl butoxide	Pesticides						X													
Pirimicarbe	pesticides							X												
Platine	Métaux							X					X							X
Plomb et ses composés	Métaux			X					X	X	X	X	X	X	X				X	X
Prochloraze	Pesticides							X	X											
Progestérone	Produits pharmaceutiques																	X		
Prométryne	Pesticides							X												
Propamocarbe HCl	Pesticides							X												
Propanolol	Produits pharmaceutiques															X	X	X		
Propazine	Pesticides							X												
Propiconazole	Pesticides							X												
Propylparabène	Cosmétiques						X													
Propylamide	Pesticides						X	X												
Pyrène	HAP							X				X	X		X				X	X
Quinmerac	Pesticides							X												
Quinoxylène	Pesticides		X							X										
Rimsulfuron	Pesticides							X												
Roxithromycine	Produits pharmaceutiques															X		X		
Rubidium	Métaux												X	X						
Sélénium	Métaux						X					X		X						
Simazine	Pesticides			X					X				X	X	X				X	X
S-Métolachlore	Pesticides							X												X
Sotalol	Produits pharmaceutiques							X								X				
Spiroxamine	Pesticides							X												
Strontium	Métaux							X												X
Sulfabenzamide	Pesticides																	X		
Sulfadiazine	Produits pharmaceutiques															X		X		
Sulfadimérazine	Produits pharmaceutiques																	X		
Sulfadiméthoxine	Produits pharmaceutiques																	X		

Micropolluants	Familles	Listes réglementaires								Listes programmes de recherche										
		Milieu						Rejets		Boues	EU		Rejets STEU	DO	EP					
		PSEE	SDP	SP	L1.2006	WL	SPAS	S.C.M	L.C.AESN	ICPE	STEU	Urbis ⁽¹⁾	ARMISTIQ	Urbis ^(1,2,3,4)	AMPERES	ARMISTIQ	SIIBEL	Urbis ⁽¹⁾	Urbis ⁽²⁾	Urbis ^(2,3,5,6)
Sulfaméthazine	Produits pharmaceutiques														X					
Sulfaméther	Produits pharmaceutiques																	X		
Sulfaméthoxazole	Produits pharmaceutiques						X		X						X	X		X		
Sulfanilamide	Produits pharmaceutiques																	X		
Sulfathiazole	Produits pharmaceutiques																	X		
Sulfosulfuron	Pesticides								X											
Tebuconazole	Pesticides	X							X		X									X
Terbutryne	Pesticides			X							X									X
Terbutylazine	Pesticides							X												
Terbutylphénol	Alkylphénols											X								
Testostérone	Produits pharmaceutiques												X					X		
Tétrabromodiphényléther	PBDE		X							X					X					
Tétrachlorobenzènes	Chlorobenzènes								X											
Tétrachloroéthylène	COV				X				X	X			X	X					X	X
Tétrachlorophénols	Chlorophénols														X					
Tétrachlorure de carbone	COV				X				X	X			X	X					X	X
Tétracycline	Produits pharmaceutiques																	X		
Thallium	Métaux							X	X						X					
Thiabendazole	Pesticides	X									X									
Thiaclopride	Pesticides					X														
Thiaméthoxame	Pesticides					X			X											
Titane	Métaux							X	X	X		X		X	X					
Toluène	BTEX	X							X	X			X						X	X
Tolyltriazole	Autres								X											
Tonalide	Cosmétiques											X								
Tramadol	Produits pharmaceutiques								X											
Triallate	Pesticides					X														
Tribromodiphényléther	PBDE									X					X					
Tributylétain	Organoétains		X						X	X	X		X	X					X	X
Tributylphosphate	Organophosphates								X	X	X	X			X					
Trichlorobenzènes	Chlorobenzènes			X					X				X	X					X	X
Trichloroéthylène	COV				X				X	X			X	X					X	X
Trichlorométhane (Chloroforme)	COV			X					X	X			X	X					X	X
Trichlorophénol	Chlorophénols								X						X					
Trichlopyr	Pesticides								X											X
Triclocarban	Pesticides						X							X						
Triclosan	Pesticides						X		X			X	X	X						
Trifluraline	Pesticides		X							X			X	X					X	X
Trimetazidine	Produits pharmaceutiques								X											
Triméthoprime	Produits pharmaceutiques															X		X		
Triphénylétain	Pesticides								X	X	X									
Tylosine	Produits pharmaceutiques															X		X		
Uranium	Métaux							X							X	X				X
Vanadium	Métaux							X	X					X	X	X				X
Vancomycine	Produits pharmaceutiques																X			
Xylènes	BTEX	X							X	X			X						X	X
Zinc et ses composés	Métaux	X							X	X	X	X	X	X	X				X	X

Présentation de l'association **ARCEAU-IdF** et de l'**Agence française pour la biodiversité**

109

Association Recherche-Collectivités dans le domaine de l'eau en Ile-de- France (ARCEAU-IdF)



Créée en avril 2013 par des grandes collectivités de la région et par des laboratoires de recherche franciliens, ARCEAU-IdF est une association principalement orientée vers la valorisation des recherches, expérimentations et actions innovantes dans le domaine de l'eau, réalisées sur le territoire de la région Ile-de-France. Unique dans sa structure, l'association constitue un lieu de débat pluraliste, créant du lien entre scientifiques, praticiens des services et élus du territoire. Depuis sa création, ARCEAU-IdF a développé de nombreux outils afin de promouvoir les collaborations entre chercheurs et collectivités. Aujourd'hui, cinq groupes de travail thématiques multi-acteurs, portant sur les petites rivières urbaines, les normes et les usages, la gestion des eaux pluviales en ville, les micropolluants et la séparation à la source des eaux usées domestiques, constitués autour d'un binôme chercheurs-opérationnels, sont actifs au sein de l'association. L'association publie régulièrement des fiches et des ouvrages thématiques et organise annuellement des journées d'étude, des ateliers et des colloques. Depuis 2016, ARCEAU-IdF anime la cellule « transfert des connaissances » du programme de recherche PIREN-Seine, en partenariat avec l'Agence de l'eau Seine-Normandie et l'EPTB Seine Grands Lacs.

Membres fondateurs : CD93, CD94, Eau de Paris, EPTB Seine Grands Lacs, Syndicat Marne Vive, SIAAP, Ville de Paris.

Membre partenaire : CD92.

Pour plus d'informations :
<http://www.arceau-idf.fr>

Agence française pour la biodiversité



L'Agence française pour la biodiversité, établissement public de l'État sous tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire, a été créée au 1^{er} janvier 2017 par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages. Elle exerce des missions d'appui à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de la connaissance, la préservation, la gestion et la restauration de la biodiversité des milieux terrestres, aquatiques et marins. Elle vient en appui aux acteurs publics mais travaille également en partenariat étroit avec les acteurs socio-économiques. Elle a aussi vocation à aller à la rencontre du public et mobilise également les citoyens autour d'actions en faveur de la biodiversité.

SES MISSIONS

- Organiser et développer les connaissances et les savoirs.
- Appuyer la mise en œuvre des politiques publiques liées à la biodiversité.
- Gérer des espaces protégés et appuyer les autres gestionnaires.
- Apporter conseil et expertise aux acteurs socio-professionnels.
- Apporter des soutiens financiers à des actions partenariales.
- Mobiliser et sensibiliser la société.
- Former et structurer les métiers de la biodiversité.

Pour plus d'informations :
<https://www.afbiodiversite.fr>

AVEC LE SOUTIEN DE L'AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ (AFB)

et la participation de :

Agence de l'eau Seine-Normandie (**AESN**) ; Association Recherche-Collectivités dans le domaine de l'eau en Ile-de-France (**ARCEAU-IdF**) ; Centre scientifique et technique du bâtiment (**CSTB**) ; Cluster Eau, Milieux et Sols (**Cluster EMS**) ; Conseil départemental des Hauts-de-Seine (**CD92**) ; Conseil départemental de la Seine-Saint-Denis (**CD93**) ; Conseil départemental du Val-de-Marne (**CD94**) ; Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (**DRIEE**) ; Groupe de recherche, d'animation technique et d'information sur l'eau (**GRAIE**) ; Institut des sciences analytiques - Centre national de la recherche scientifique (**ISA-CNRS**) ; Laboratoire d'Ecologie des hydrosystèmes Naturels et Anthropisés - Centre national de la recherche scientifique - Université Claude Bernard, Lyon 1 (**LEHNA, CNRS-UCBL**) ; Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions - Institut national des sciences appliquées de Lyon (**DEEP-INSA-Lyon**) ; Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains - Université Paris-Est Créteil/Ecole des Ponts ParisTech (**LEESU-UPEC**) ; Laboratoire Eau Environnement - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux de Nantes (**LEE-IFSTTAR-Nantes**) ; Syndicat interdépartemental de l'assainissement et de l'agglomération parisienne (**SIAAP**) ; **Ville de Paris** ; **Laboratoire Watchfrog**.

Éditeur :

ARCEAU-IdF 2018

Crédits photos :

Tuyau qui se déverse dans l'eau (couverture et p.18) : koosen/shutterstock

Tuyau vue de l'intérieur (couverture) : Vladimir Mulder/shutterstock

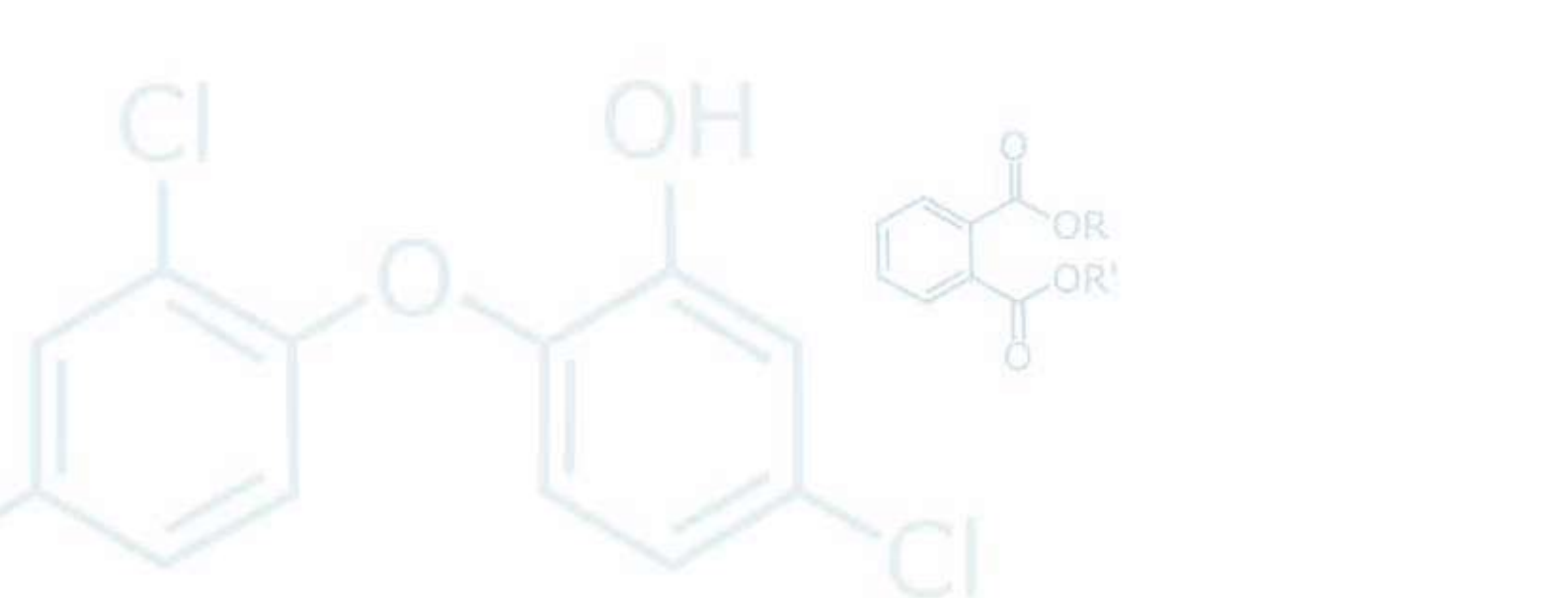
Pluie sur le trottoir (couverture et p.44) : Sergey Zaykov/shutterstock

Pluie sur la fenêtre à Paris (couverture) : bellena/shutterstock

Station d'épuration (couverture) : W.Tab/shutterstock

Création graphique :

 id bleue - Sablé (72)



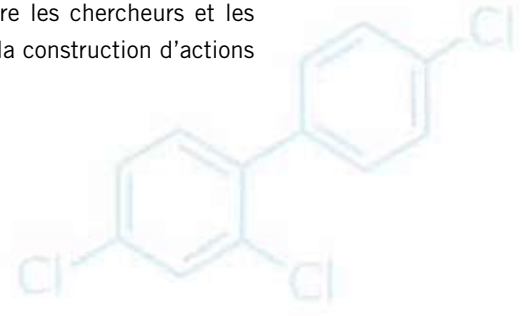
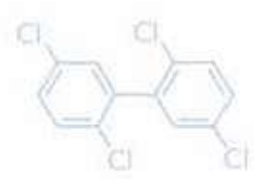
Que sait-on des **micropolluants** dans les eaux urbaines ?



Cet ouvrage synthétise les connaissances scientifiques récentes sur les micropolluants dans les agglomérations urbaines. Il a pour ambition d'apporter des éléments de réponse aux interrogations opérationnelles des acteurs du domaine de l'eau et de l'assainissement et de favoriser ainsi une prise de conscience et des actions pour une meilleure gestion des micropolluants.

Il s'appuie essentiellement sur les travaux des trois observatoires français en hydrologie urbaine (OPUR à Paris, OTHU à Lyon et ONEVU à Nantes), structurés autour de partenariats durables entre chercheurs et acteurs opérationnels. Depuis une vingtaine d'années, ces observatoires produisent des données et des connaissances sur les sources et les transferts des micropolluants et sur l'efficacité des différentes stratégies de gestion des eaux urbaines.

Élaboré au sein du groupe « Micropolluants » de l'association ARCEAU-IdF avec le soutien et le financement de l'Agence française pour la biodiversité, cet ouvrage représente une étape importante dans le transfert des connaissances entre les chercheurs et les opérationnels. Il constitue un premier outil pour l'animation et la construction d'actions en faveur de la protection de l'environnement.



ISBN 978-2-490463-01-5



9782490463015



ARCEAU
Île-de-France

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT