

Indicateurs chimiques d'efficacité de traitement et d'influence des rejets de stations d'épuration sur le milieu récepteur

■ A. BRUCHET¹, S. MARTIN¹, M. COQUERY²

Mots-clés : eaux résiduaires, indicateurs, qualité du milieu récepteur, efficacité de traitement, station d'épuration domestique, substances prioritaires et émergentes

Keywords: wastewater, indicators, quality of receiving waters, treatment efficiency, urban wastewater treatment plant, priority and emerging substances

Introduction

Courant 2012, le registre des Chemical Abstracts (www.cas.org) a répertorié plus de 68 millions de substances organiques et inorganiques et ce nombre croît à raison d'environ 15 000 substances nouvelles par jour. La base de données Chemcats liste 20 millions de substances commercialement disponibles. La base de données Chemlist (*regulated chemicals listing*) répertorie 295 000 substances soumises à réglementation/recommandations. La base de données des « High Production Volume Chemicals » de l'OCDE, qui prend en compte les substances produites ou importées en quantités supérieures ou égales à 1 000 tonnes par an dans une région membre de l'OCDE, contient environ 4 000 substances. L'expérience passée montre cependant que des substances utilisées à des tonnages beaucoup plus faibles (exemple : sulfaméthoxazole et carbamazépine, respectivement 23 et 37 tonnes utilisées en médecine humaine en France en 1998) sont souvent retrouvées dans les eaux résiduaires et les eaux continentales [TERNES et JOSS, 2006]. En ce qui concerne l'Europe, on estime à plus de 110 000 le nombre de substances chimiques mises sur le marché communautaire, et 30 000 d'entre elles seraient utilisées, importées ou produites en Europe

à plus d'une tonne par an [MEEDM, 2010a]. Si l'on tient également compte des produits de dégradation et de recombinaison de ces substances chimiques, ainsi que des substances issues du métabolisme humain, il est donc clair que le nombre de substances susceptibles d'être présentes en entrée de station d'épuration des eaux usées (STEU) doit être de l'ordre de dizaines, voire de centaines de milliers.

Dans ce contexte, les quelques centaines de substances mesurées dans les études les plus exhaustives ne représentent qu'une fraction infime des composés présents, même si cela a demandé des efforts analytiques très importants, par exemple N'GUYEN et coll. [1994], TERNES et JOSS [2006], MIÈGE et coll. [2009]. Ainsi, il faut se faire à l'idée que de nouvelles substances vont être sans cesse découvertes et que l'on va certainement passer au cours de la décennie à venir de quelques centaines à quelques milliers de composés détectés. D'ores et déjà, en appliquant une technique de chromatographie gazeuse bidimensionnelle (GCxGC ou GC-2D) couplée à un spectromètre de masse à temps de vol (MS-TOF), SEMARD et coll. [2008] ont permis la détection courante de 1 000-2 000 composés dans divers échantillons d'eaux résiduaires urbaines. La commercialisation récente de couplages HPLC-MS/MS (chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse en tandem) à haute résolution, qui semblent enfin offrir la possibilité d'identification de molécules inconnues d'intérêt

¹ Suez-Environnement – 38, rue du Président-Wilson – 78230 Le Pecq.
Courriel : auguste.bruchet@suez-env.com

² Irstea – UR MALY – 5, rue de la Doua – CS70077 – 69626 Villeurbanne cedex.

toxicologique (médicaments, pesticides, drogues), viendra en complément pour identifier des molécules plus polaires que celles qui relèvent de la chromatographie gazeuse.

La directive cadre sur l'eau (DCE) et ses directives filles [EC, 2013] ont pour objectif de restaurer le bon état chimique et écologique des masses d'eau, ce qui contraint, entre autres, à limiter les émissions de micropolluants par les stations d'épuration. Une conséquence majeure du nombre phénoménal de micropolluants potentiellement présents dans une STEU est que leur analyse exhaustive demeurera inaccessible à un horizon prévisible. Pour simplifier le travail des pouvoirs publics et des opérateurs de STEU, tout en minimisant le coût du suivi réglementaire, l'une des approches possibles consiste à se fonder sur le suivi d'un nombre restreint de substances indicatrices pour évaluer l'efficacité des procédés de traitement et l'impact des STEU sur la qualité du milieu récepteur. Cette liste restreinte n'aura donc pas vocation à mesurer les effets biologiques sur le milieu, encore moins à mesurer l'impact des expositions à des mélanges complexes.

L'objectif de cet article consiste, à partir de l'examen de la littérature ainsi que de l'examen d'études antérieures menées essentiellement en France, et à un degré moindre dans d'autres pays européens et aux États-Unis, à proposer une liste restreinte de substances représentatives de l'efficacité des traitements d'épuration et de l'influence des rejets urbains sur le milieu récepteur.

1. La littérature sur la notion d'indicateurs d'eaux résiduaires

L'utilisation de micropolluants organiques comme traceurs de contamination fécale ou d'eaux résiduaires est ancienne. Dès 1974, un rapport de l'USEPA [USEPA, 1974] montrait que l'évolution du coprostanol dans des eaux résiduaires non chlorées suivait celle des micro-organismes indicateurs et mentionnait son utilisation comme indicateur de contamination fécale. Le coprostanol est de fait formé par réduction du cholestérol dans l'intestin des mammifères. Plus récemment, GLASSMEYER et coll. [2005] ont étudié 110 composés organiques en amont et en aval de stations d'épuration et retenu une liste de

35 substances constituant de bons indicateurs potentiels (c'est-à-dire non présents en amont des STEU, présents en sortie de STEU et présents en aval dans le milieu récepteur, à une concentration qui décroît avec la distance), parmi lesquels on trouve des stéroïdes, muscs, médicaments, le phénol, la caféine, la benzophénone, des retardateurs de flamme phosphorés... Dû à leurs variations de concentrations entre les types de points échantillonnés, l'éthyl citrate, le galaxolide et le tonalide sont présentés comme de bons indicateurs d'eaux usées, mais les substances ingérées spécifiquement par les humains (carbamazépine, diphénhydramine et caféine) sont considérées comme de meilleurs indicateurs de contamination fécale. Parmi les stéroïdes étudiés, le coprostanol est considéré comme le meilleur indicateur de contamination fécale. NAKADA et coll. [2008] ont également étudié 13 médicaments et cosmétiques en tant que marqueurs potentiels d'eaux résiduaires dans des eaux de surface, souterraines et côtières. Leurs données démontrent l'utilité de la carbamazépine et du crotamiton comme marqueurs conservatifs. Le crotamiton est une substance utilisée dans les crèmes ou lotions acaricides ou comme anti-prurigineux. La présence de cette substance dans une eau résiduaire française traitée a aussi été reportée par SEMARD et coll. [2008]. NAKADA et coll. [2008] ont recommandé d'utiliser ces deux substances (carbamazépine et crotamiton) en combinaison avec d'autres traceurs plus labiles (ibuprofène, thymol, caféine, kétoprofène, naproxène, triclosan) pour tracer les entrées d'eaux résiduaires insuffisamment traitées.

Si les indicateurs mentionnés précédemment se recoupent assez souvent (carbamazépine, caféine, coprostanol), certains autres indicateurs potentiels ont été identifiés plus récemment, mais n'ont fait l'objet que de peu d'études. Ainsi, LOOS et coll. [2009] ont mesuré le sucralose. Il s'agit d'un édulcorant artificiel (E955) qui remplace le sucre dans des aliments ou boissons à faible valeur calorique. Ce dérivé chloré du saccharose traverse le corps sans être métabolisé. Il n'est pas non plus affecté par les traitements d'épuration et est extrêmement stable dans les eaux. Ce composé a été retrouvé dans des rivières de différents pays européens, à des niveaux allant

jusqu'à 1 µg/L. Cette substance pourrait être considérée comme un traceur quasi parfait d'eaux résiduaires urbaines, car sa méthode d'analyse est classique (extraction en phase solide-LC-MS/MS) ; néanmoins, LOOS et coll. [2009] ont montré que la forme (symétrie) de son pic chromatographique est loin d'être parfaite, ce qui est préjudiciable à son analyse quantitative. Un autre édulcorant présentant les mêmes caractéristiques de résistance aux procédés d'épuration et de stabilité dans les eaux, l'acésulfame, a été également identifié [SCHEURER *et al.*, 2010]. Ce composé a été mesuré à des niveaux maximaux de 2,7 et 4,7 µg/L dans des eaux de surface et souterraines en Allemagne et en Suisse. Le sucralose est résistant à l'ozonation, tandis que l'acésulfame est partiellement éliminé dans les conditions d'usines de potabilisation (18-60 %). Le sucralose est bien éliminé par des filtres à charbon actif en grains industriels, tandis que le degré d'élimination de l'acésulfame dépend de la saturation du filtre. Dans la mesure où l'acésulfame a montré une bonne corrélation avec la carbamazépine dans diverses rivières allemandes [LANGE *et al.*, 2011], l'intérêt de rajouter cet indicateur n'est pas évident.

Le gadolinium, agent de contraste qui est utilisé en imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire (RMN), a notamment été utilisé pour tracer l'influence d'une STEU sur un site de production d'eau potable situé 100 km en aval [LAWRENCE et BARIEL, 2010]. L'inconvénient potentiel des agents de contraste réside dans le fait qu'ils sont administrés dans des hôpitaux où ils vont être concentrés dans les effluents, mais qu'ils continuent à être excrétés dans les eaux usées lorsque le patient retourne à la maison. Comme pour le bore, le gadolinium (terre rare) peut présenter un fond géochimique qu'il convient de bien connaître pour corriger les résultats [LAWRENCE et BARIEL, 2010]. Par ailleurs, les unités d'imagerie RMN ne fonctionnent pas forcément en continu pendant toute la semaine, ce qui nécessite de moyenniser des données issues de plusieurs prélèvements moyens 24 heures. Le gadolinium pourrait malgré tout constituer un meilleur traceur que le bore, du fait d'un fond géochimique plus faible et d'une très mauvaise élimination dans les STEU (environ 10 %) [TELGEMANN *et al.*, 2012].

Pour des raisons de plus grande facilité d'analyse, le bore demeure malgré tout un indicateur de premier choix.

De plus, certains indicateurs ont été proposés pour évaluer un type de traitement précis. Ainsi, DICKENSON et coll. [2009] se sont intéressés plus particulièrement aux procédés d'ozonation et de peroxydation. Ces auteurs concluent que la dilantine, le méprobamate, l'insecticide DEET (*N,N*-diéthyl-*mé*-toluamide) et l'iopromide sont de bons indicateurs d'une oxydation optimisée lors d'un traitement complémentaire (tertiaire), car ces substances ne sont que partiellement éliminées par des doses d'ozone trop faibles. L'élimination de ces paramètres s'avère également bien corrélée à l'élimination de l'absorbance UV à 254 nm qui peut donc constituer un bon « surrogate », car il est par ailleurs facile à mesurer. Le taux d'exposition à l'ozone, exprimé en CT₁₀, s'est également avéré un paramètre prometteur pour prédire l'efficacité de l'ozonation [DICKENSON *et al.*, 2009]. La même étude montre cependant qu'un CT > 10 mg-min/L s'est avéré nécessaire pour obtenir une élimination supérieure à 90 % pour l'iopromide et le méprobamate. Enfin, le cas de la situation suisse est particulièrement intéressant. Il s'agit du seul pays où des substances indicatrices ont été inscrites dans une proposition de texte réglementaire [OFEV, 2009]. Il s'agit des cinq substances suivantes :

- médicaments : carbamazépine, diclofénac, sulfaméthoxazole ;
- produit chimique d'usage domestique : benzotriazole ;
- herbicide : mécoprop.

Ces substances ont été initialement proposées par GÖTZ et coll. [2010]. La sélection de ces cinq substances a été faite à partir d'une liste de 30 micropolluants comprenant des agents de contraste iodés, des médicaments, des biocides, des perturbateurs endocriniens et deux autres substances, retrouvées dans toute la Suisse. Les critères de sélection incluent les tonnages utilisés en Suisse, la fréquence de quantification et la concentration moyenne dans les eaux résiduaires suisses. Des données sur l'efficacité de traitement en STEU secondaire et complémentaire ont été ensuite collectées dans la littérature pour des procédés biologiques, d'ozonation et d'adsorption sur charbon actif. Les substances sélectionnées ont été

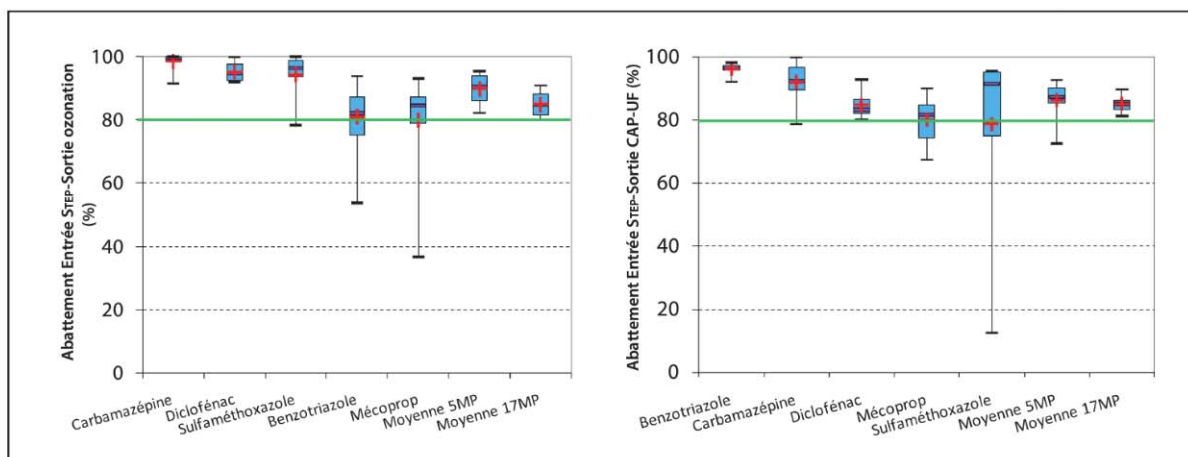


Figure 1. Élimination des cinq indicateurs suisses et de 17 autres micropolluants (MP) en ozonation (gauche) et sur couplage charbon actif en poudre/ultrafiltration sur membranes (CAP/UF) (droite) [OFEV, 2011]

choisies parmi celles mal éliminées par traitement biologique, mais pouvant être éliminées par ozonation ou adsorption. Les substances mal éliminées par traitement complémentaire, comme les agents de contraste iodés, n'ont pas été retenues. Dans le groupe des biocides, une substance comme le diuron n'a pas été retenue du fait de l'absence de données de comportement lors des traitements d'épuration. Enfin, dans le groupe des perturbateurs endocriniens, une substance comme l'estrone, éliminée à seulement 59 % (avec une grande variabilité) par traitement biologique, mais très bien éliminée par traitements complémentaires, aurait pu être retenue.

Leur devenir dans les STEU avec des traitements avancés a été étudié dans le cadre de l'étude menée en Suisse sur la STEU de Vidy à Lausanne [OFEV, 2011]. La figure 1 montre les pourcentages d'élimination observés en ozonation et en couplage charbon actif en poudre/ultrafiltration sur membranes (CAP/UF).

La figure 1 montre également l'élimination moyenne de 17 autres micropolluants systématiquement trouvés dans les eaux résiduelles testées. La dose d'ozone était comprise entre 4 et 9 mg/L et la dose de CAP entre 10 et 20 mg/L. Ces cinq substances étaient éliminées à moins de 40 % dans le traitement biologique (à lit fluidisé). Les deux types de traitement éliminaient bien les cinq indicateurs (> 80 %) lorsque les autres micropolluants détectés dans toutes les campagnes de mesure (17 micropolluants) étaient éliminés également à plus de 80 %. On observe cependant une

forte variation des résultats sur le benzotriazole et le mécoprop en ozonation et sur le sulfaméthoxazole en CAP/UF. D'après ces résultats, il semble qu'une bonne élimination de la carbamazépine et du diclofénac puisse garantir une bonne élimination des autres micropolluants les plus fréquemment quantifiés dans les eaux usées.

Il est à noter que l'Office fédéral de l'environnement suisse (OFEV) a prévu d'étendre au deuxième semestre 2014 sa liste à une douzaine d'indicateurs, après étude du comportement d'environ 450 substances dans diverses stations d'épuration.

2. Critères de choix d'indicateurs et méthodologie utilisée

Un indicateur d'efficacité des STEU et de leur influence sur le milieu naturel devrait répondre *a minima* aux critères suivants :

- sa fréquence de quantification (Freq) doit être la plus proche possible de 100 % pour les eaux brutes purement domestiques (critère 1) ;
- pour un indicateur destiné à contrôler l'impact d'une station d'épuration sur le milieu récepteur, sa concentration en eau traitée devra être significative³ par rapport à son impact potentiel, généralement exprimé par la norme de qualité environnementale (NQE, [EC, 2013]) (critère 2) ;

³ Un facteur 10 de dilution est couramment utilisé – valeur par défaut – entre rejet et milieu naturel.

– pour un indicateur destiné à évaluer l'efficacité d'un procédé de traitement des eaux résiduaires, sa concentration dans les eaux usées brutes devra être suffisamment au-dessus de sa limite de quantification (LQ) pour permettre une évaluation précise de son élimination. De plus, ce type d'indicateur devra avoir un comportement bien connu par rapport aux principaux procédés d'épuration (critère 3) et l'ensemble des indicateurs devra être représentatif de familles chimiques différentes ayant des comportements différents lors du traitement de l'eau ;

– les indicateurs sélectionnés devront évidemment être facilement mesurables de façon robuste (critère 4).

La méthodologie adoptée a consisté dans un premier temps à recenser les micropolluants quantifiés dans le cadre d'études antérieures dans des eaux résiduaires brutes et traitées, pour en dégager la fréquence de quantification (critère 1) ainsi que la concentration moyenne en entrée et en sortie de STEU (critère 2), cela afin de proposer des indicateurs d'influence sur le milieu récepteur. Dans un second temps, diverses études détaillant le comportement de micropolluants dans des procédés unitaires d'épuration primaires, secondaires et complémentaires (tertiaires) ont été examinées pour proposer des indicateurs d'efficacité des procédés d'épuration (critère 3).

2.1. Substances retrouvées dans les eaux résiduaires et naturelles : fréquences de quantification et concentrations moyennes

Nous avons compilé début 2011 les résultats de 12 projets de recherche ou campagnes d'analyses impliquant des sites de Lyonnaise des Eaux ou Suez Environnement (SE). Les résultats provenant de sites hors groupe SE, en particulier ceux générés par la première campagne RSDE⁴, ont été incorporés. Parmi ces études, trois concernaient des eaux résiduaires urbaines : projet Amperes⁵, projet filiale de Suez Environnement (AGBAR, projet R+i Alliance HE0607, données internes) sur les médicaments dans des eaux résiduaires espagnoles, projet sur les perturbateurs endocriniens dans des stations européennes et améri-

caines [JANEX-HABIBI *et al.*, 2009]. Le projet RSDE portait essentiellement sur des effluents français purement industriels (2 648 sites) et sur des effluents de STEU domestiques ou mixtes, 39 sites). D'autres études concernaient des rejets hospitaliers (projet Mediflux [MULLOT, 2009]), et des sites de potabilisation d'eau à partir d'eaux souterraines ou de surface (données internes Lyonnaise des Eaux).

Sur les quelque 420 micropolluants organiques et minéraux recherchés dans ces différentes études, 192 ont été recherchés dans des eaux résiduaires brutes purement domestiques. L'essentiel de ces données provient des projets Amperes (15 sites, 127 substances prioritaires et émergentes recherchées) et du projet d'AGBAR (cinq ou six sites) sur les médicaments dans les eaux résiduaires (101 médicaments recherchés). Le *tableau I* montre, pour ces deux études, la liste des substances quantifiées avec une fréquence d'au moins 50 % dans les eaux brutes (à l'exception du penta- et hexabromodiphényléther). Les données pour l'éthinylestradiol proviennent de l'étude Cirsee (13 sites dont cinq en France, un en Allemagne, un en Italie, deux au Royaume-Uni, deux en Espagne et deux aux États-Unis) [JANEX-HABIBI *et al.*, 2009] sur les perturbateurs endocriniens (quatre hormones estrogènes, octyl- et nonylphénols). Dans le *tableau I*, nous avons exclu volontairement les substances retrouvées dans les effluents purement industriels, car la notion d'indicateurs pour ce type d'effluents ne peut être que relative à un type d'activité. Néanmoins, il est clair que de nombreux composés industriels sont utilisés par les ménages et que des industries peuvent être connectées au réseau d'eaux résiduaires urbaines, d'où la présence de nombreux composés industriels/synthétiques dans des stations considérées comme principalement urbaines.

111 composés ont été quantifiés avec une fréquence d'au moins 50 % dans les eaux usées brutes ou traitées étudiées, à des concentrations moyennes comprises entre 1,8 ng/L (éthinylestradiol) et 1 mg/L (zinc, fer). Ces substances comprennent des substances prioritaires de la DCE [EC, 2013], dont des métaux, des détergents non ioniques (nonylphénols et dérivés), des pesticides (diuron, atrazine), des retardateurs de flamme (polybromodiphényléthers),

⁴ RSDE : projet national « Recherche et réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux ».

⁵ Amperes : projet ANR PRECODD 2005 « Analyse de polluants prioritaires et émergents dans les eaux usées » (<http://projetamperes.cemagref.fr/>).

Substances (Concentrations en µg/L)	Eau urbaine (entrée station)						Eau urbaine traitée					
	Projet Amperes/Agbar						Amperes/Agbar					
	Nombre de sites	Freq (%)	Moyenne (µg/L)	Écart type	Min. (µg/L)	Max. (µg/L)	Nombre de sites	Freq (%)	Moyenne (µg/L)	Écart type	Min. (µg/L)	Max. (µg/L)
Acébutolol	15	100	3E+00	2E+00	5E-01	9E+00	15	100	5E-01	8E-01	3E-02	3E+00
Alkylphénol-polyéthoxy-phénoxyacétiques acides	15	93	2E+00	3E+00	1E-01	9E+00	15	100	3E+00	4E+00	2E-01	2E+01
Aluminium (métal total)	15	100	1E+03	5E+02	2E+01	2E+03	15	80	8E+01	1E+02	6E+00	5E+02
Amidotrizoïque acide (diatrizoate)	5	80	3E-02	4E-02	0E+00	9E-02	5	40	9E-03	1E-02	0E+00	2E-02
Amitriptyline	15	100	1E-01	1E-01	1E-02	5E-01	15	93	2E-02	2E-02	2E-03	5E-02
AMPA (acide aminométhylphosphonique)	15	73	6E-01	9E-01	8E-02	2E+00	15	33	3E+00	3E+00	4E-01	9E+00
Antimoine (métal total)	15	100	4E-01	4E-01	2E-01	2E+00	15	100	4E-01	2E-01	1E-01	9E-01
Argent	15	87	4E+00	7E+00	1E-02	3E+01	15	47	2E-01	2E-01	3E-02	7E-01
Arsenic (métal total)	15	100	2E+00	2E+00	3E-01	8E+00	15	100	2E+00	2E+00	1E-01	8E+00
Aspirine (acide acétylsalicylique)	15	100	1E+02	1E+02	2E+00	3E+02	15	87	2E-01	2E-01	4E-02	6E-01
Aténolol	15	100	2E+00	1E+00	7E-01	6E+00	15	100	6E-01	6E-01	5E-02	2E+00
Atrazine	15	60	2E-02	1E-02	4E-03	3E-02	15	60	2E-02	2E-02	2E-03	8E-02
Azithromycine	5	60	1E-02	2E-02	0E+00	4E-02	5	100	1E-01	1E-01	4E-02	3E-01
Baryum	15	100	4E+01	3E+01	8E+00	9E+01	15	100	1E+01	9E+00	4E+00	3E+01
Benzothiazole	15	100	4E-01	2E-01	1E-01	8E-01	15	93	1E-01	8E-02	5E-02	4E-01
Bétaxolol	15	67	3E-02	2E-02	7E-03	5E-02	15	40	1E-02	8E-03	5E-03	3E-02
Bézafrate	5	80	1E-01	1E-01	0E+00	3E-01	5	60	2E-01	2E-01	0E+00	6E-01
Bisoprolol	15	100	2E-01	9E-02	5E-02	4E-01	15	93	1E-01	7E-02	9E-03	2E-01
Bisphénol A (BPA)	15	60	1E-01	1E-01	4E-02	5E-01	15	53	8E-02	9E-02	2E-02	3E-01
Bore	15	100	2E+02	9E+01	7E+01	4E+02	15	100	2E+02	9E+01	7E+01	4E+02
Bromazépam	15	93	6E-02	9E-02	2E-03	2E-01	15	73	1E-02	8E-03	1E-03	3E-02
Butylphénol (4-tert-butylphénol)	15	87	9E-01	1E+00	7E-02	4E+00	15	80	6E-02	6E-02	2E-02	2E-01
Cadmium (métal total)	15	100	2E-01	1E-01	3E-02	4E-01	15	100	8E-02	5E-02	1E-02	2E-01
Caféine	15	100	4E+00	2E+00	2E-02	8E+00	15	100	3E-01	4E-01	5E-03	1E+00
Carbamazépine	15	93	8E-01	5E-01	2E-01	2E+00	15	80	8E-01	5E-01	2E-01	2E+00
Carbamazépine époxyde (métabolite carbamazépine)	6	100	2E+00	1E+00	9E-01	4E+00	6	100	1E+00	1E+00	7E-02	2E+00
Cétirizine	6	100	1E+00	1E+00	2E-01	4E+00	6	83	3E-01	2E-01	0E+00	5E-01
Chlordiazépoxyde	6	100	3E+00	2E+00	3E-01	6E+00	6	100	1E+00	1E+00	1E-01	4E+00
Chrome (métal total)	15	100	8E+00	1E+01	5E-01	5E+01	15	100	2E+00	5E+00	3E-01	2E+01
Cimétidine	5	100	6E-02	6E-02	3E-03	2E-01	5	80	4E-02	6E-02	0E+00	1E-01
Clarithromycine	5	100	2E-01	2E-01	7E-02	5E-01	5	100	2E-01	2E-01	8E-02	4E-01
Cuivre (métal total)	15	100	6E+01	4E+01	9E+00	1E+02	15	100	9E+00	9E+00	2E+00	3E+01
Di(2éthylhexyl)phthalate (DEHP)	15	100	7E+01	8E+01	2E+01	4E+02	15	100	1E+01	2E+01	1E+00	9E+01
Diazépam	15	87	1E-02	2E-02	6E-04	6E-02	15	80	9E-03	2E-02	6E-04	6E-02
Dibutylétain cation	15	67	5E-02	7E-02	1E-03	2E-01	15	47	5E-03	5E-03	9E-04	1E-02
Dichlorométhane	15	60	2E+00	2E+00	7E-02	8E+00	15	27	1E+00	2E+00	8E-02	4E+00
Dichlorophénols	15	80	6E-01	1E+00	1E-01	4E+00	15	40	2E-01	1E-01	7E-02	3E-01
Diclofénac	15	93	8E-01	5E-01	6E-04	2E+00	15	93	6E-01	5E-01	7E-03	1E+00
Diltiazem	6	67	8E-03	1E-02	0E+00	2E-02	6	50	7E-03	9E-03	0E+00	2E-02
Diphényléther (pentabromodiphényléther)	15	7	9E-01	0E+00	9E-01	9E-01	15	0				
Diphényléther (hexabromodiphényléther)	15	13	2E-02	2E-02	7E-03	4E-02	15	0				
Diphényléther (Décabromodiphényléther)	15	53	1E+00	2E+00	8E-02	6E+00	15	13	4E-03	5E-04		
Diuron	15	80	2E-01	4E-01	2E-02	1E+00	15	93	2E-01	2E-01	6E-03	8E-01
Érythromycine	5	80	1E-02	1E-02	0E+00	2E-02	5	100	5E-02	5E-02	2E-02	1E-01
Éthinyl estradiol (EE)	13	70	1,84E-03	1,36E-03	0,00E+00	3,30E-03	13	30	5,70E-04	9,23E-04	0,00E+00	2,10E-03
Estradiol 17 alpha estradiol	15	73	6E-03	5E-03	1E-03	2E-02	15	33	5E-02	1E-01	2E-03	2E-01
Estradiol 17 bêta	15	100	3E-02	2E-02	6E-03	9E-02	15	47	5E-03	5E-03	8E-04	1E-02
Estriol	15	100	3E-01	2E-01	3E-02	7E-01	15	27	4E-02	2E-02	3E-02	6E-02
Estrone (E1)	15	100	9E-02	5E-02	2E-02	2E-01	15	0				
Étain (métal total)	15	100	4E+00	2E+00	6E-01	1E+01	15	80	5E-01	6E-01	1E-01	2E+00
Famotidine	5	80	7E-02	5E-02	0E+00	1E-01	5	100	6E-02	6E-02	1E-02	1E-01
Fer (métal total)	15	100	1E+03	3E+03	2E+02	1E+04	15	100	2E+02	3E+02	3E+01	1E+03
Fluoranthène	15	87	2E-01	1E-01	4E-02	3E-01	15	73	4E-02	2E-02	2E-02	1E-01
Fluoxétine	15	100	4E-02	3E-02	3E-03	1E-01	15	100	1E-02	9E-03	1E-03	3E-02
Furosémide	6	100	8E-01	5E-01	2E-01	1E+00	6	50	3E-01	3E-01	0E+00	6E-01
Gemfibrozil	15	93	1E+00	8E-01	1E-02	3E+00	15	87	2E-01	2E-01	1E-02	8E-01
Hydrochlorothiazide	6	100	2E+00	1E+00	3E-01	4E+00	6	67	8E-01	9E-01	0E+00	2E+00
Ibuprofène	15	100	1E+01	6E+00	1E-02	2E+01	15	80	6E-01	8E-01	2E-02	2E+00
Indométacine	5	60	7E-02	1E-01	0E+00	2E-01	5	40	4E-02	6E-02	0E+00	1E-01
Iohexol	5	60	8E-02	1E-01	0E+00	3E-01	5	60	5E-01	6E-01	0E+00	1E+00
Iopromide	5	100	8E-02	9E-02	1E-02	2E-01	5	100	4E-01	3E-01	2E-02	8E-01
Irbésartan	6	100	2E+00	1E+00	3E-01	3E+00	6	100	2E+00	1E+00	2E-01	3E+00
Kétoprofène	15	100	5E+00	2E+00	1E+00	8E+00	15	100	1E+00	1E+00	1E-01	6E+00
Labétalol	6	67	2E-01	2E-01	0E+00	5E-01	6	50	1E-01	1E-01	0E+00	3E-01
Lansoprazole	5	80	6E-03	1E-02	0E+00	3E-02	5	80	9E-02	2E-01	0E+00	4E-01
Lincomycine	5	80	6E-01	1E+00	0E+00	3E+00	5	100	3E-01	6E-01	5E-04	1E+00
Lisinopril	6	100	1E-01	1E-01	3E-03	3E-01	6	67	6E-02	6E-02	0E+00	1E-01

Le code couleurs concerne les substances prioritaires de la directive cadre eau [EC, 2013] ; jaune = substance prioritaire DCE ; rouge = substance dangereuse prioritaire ; vert = substances spécifiques de l'état écologique [MEEDM, 2010b]. En gras : les substances qui présentent des concentrations potentiellement supérieures à la norme de qualité environnementale NQE (proposée ou actuelle).

Tableau I. Exemple de substances retrouvées dans les eaux usées domestiques brutes à une fréquence de quantification (Freq) supérieure à 50 %. Résultats du projet Amperes et de l'étude d'AGBAR (concentrations en µg/L dans les eaux brutes et les eaux traitées de 15 stations d'épuration)

Substances (Concentrations en µg/L)	Eau urbaine (entrée station)						Eau urbaine traitée					
	Projet Amperes/Agbar						Amperes/Agbar					
	Nombre de sites	Freq (%)	Moyenne (µg/L)	Écart type	Min. (µg/L)	Max. (µg/L)	Nombre de sites	Freq (%)	Moyenne (µg/L)	Écart type	Min. (µg/L)	Max. (µg/L)
Lithium	15	100	1E+01	7E+00	3E+00	3E+01	15	100	1E+01	9E+00	3E+00	3E+01
Losartan	6	100	4E-01	2E-01	1E-02	6E-01	6	83	3E-01	3E-01	0E+00	7E-01
Mercuré (métal total)	15	100	3E-01	3E-01	8E-03	1E+00	15	100	2E-02	3E-02	9E-04	1E-01
Métoprolol	15	100	2E-01	1E-01	5E-03	5E-01	15	93	2E-01	1E-01	8E-03	4E-01
Mévastatine	5	60	3E-02	3E-02	0E+00	5E-02	5	20	1E-02	2E-02	0E+00	5E-02
Naphtalène	15	67	1E-01	1E-01	3E-02	4E-01	15	13	1E-01	2E-01	2E-02	2E-01
Naproxène	15	100	2E+00	1E+00	6E-02	4E+00	15	93	7E-01	7E-01	3E-03	2E+00
Nickel (métal total)	15	100	1E+01	1E+01	2E+00	6E+01	15	100	6E+00	5E+00	8E-01	2E+01
Nonylphénol (4-Nonylphenol)	15	100	1E+01	1E+01	6E-01	3E+01	15	100	7E-01	8E-01	1E-01	3E+00
Nonylphénol 4-NP1EO (nonylphénols mono-éthoxylate)	15	100	4E+00	4E+00	3E-01	2E+01	15	100	4E-01	4E-01	5E-02	1E+00
Nonylphénol 4-NP2EO (nonylphénols di-éthoxylate)	15	100	2E+00	2E+00	2E-01	8E+00	15	100	6E-01	1E+00	4E-02	5E+00
Octylphénols 4-t-OP (octylphénols)	15	87	4E+00	6E+00	5E-02	2E+01	15	80	1E-01	2E-01	9E-03	5E-01
Oméprazole	5	100	1E+00	2E+00	3E-03	5E+00	5	100	9E-03	9E-03	1E-03	2E-02
Oméprazole (4-OH-oméprazole)	5	100	2E-01	2E-01	5E-02	6E-01	5	100	3E-01	4E-01	7E-02	1E+00
Oméprazole (5-O-desMe oméprazole)	5	80	2E-02	2E-02	0E+00	6E-02	5	80	2E-02	2E-02	0E+00	5E-02
Oxazépam	6	100	4E-01	5E-01	2E-02	1E+00	6	100	2E-01	1E-01	3E-02	3E-01
Paracétamol	15	100	2E+02	9E+01	2E-01	3E+02	15	100	1E-01	2E-01	1E-03	8E-01
Phénobarbital	5	100	1E-01	2E-01	3E-02	4E-01	5	100	1E-01	1E-01	5E-02	3E-01
Phénytoïne	6	100	5E-02	3E-02	6E-03	9E-02	6	83	9E-02	6E-02	0E+00	2E-01
Plomb (métal total)	15	100	5E+00	4E+00	4E-01	1E+01	15	100	9E-01	1E+00	1E-01	4E+00
Pravastatine	5	60	3E-01	4E-01	0E+00	1E+00	5	60	2E-01	2E-01	0E+00	6E-01
Primidone	6	50	1E-01	1E-01	0E+00	3E-01	6	33	6E-02	9E-02	0E+00	2E-01
Ranitidine	5	100	7E-01	1E+00	1E-01	3E+00	5	100	2E+00	4E+00	2E-02	1E+01
Roxithromycine	15	93	2E-01	2E-01	2E-02	1E+00	15	100	9E-02	1E-01	4E-03	6E-01
Rubidium	15	100	2E+01	4E+00	7E+00	2E+01	15	100	1E+01	5E+00	5E+00	2E+01
Salbutamol	15	93	1E-02	8E-03	4E-03	3E-02	15	93	1E-02	7E-03	6E-04	2E-02
Salicylique acide	5	80	7E-01	7E-01	0E+00	2E+00	5	0				
Sildénafil N-desméthyl	5	60	6E-02	9E-02	0E+00	2E-01	5	20	9E-04	2E-03	0E+00	5E-03
Simazine	15	47	2E-02	2E-02	7E-03	5E-02	15	60	3E-02	4E-02	3E-03	1E-01
Sotalol	15	87	9E-01	7E-01	1E-01	3E+00	15	100	1E+00	8E-01	1E-01	3E+00
Sulfaméthazine	5	100	2E-02	1E-02	3E-03	4E-02	5	60	1E-02	1E-02	0E+00	2E-02
Sulfaméthoxazole	15	87	7E-01	8E-01	2E-02	3E+00	15	100	3E-01	3E-01	5E-03	1E+00
Terbutaline	15	100	1E+01	6E+00	2E-02	2E+01	15	87	5E-03	3E-03	2E-03	9E-03
Théophylline	15	100	1E+01	6E+00	2E-02	2E+01	15	100	3E-01	3E-01	7E-03	1E+00
Timolol	15	47	5E-03	4E-03	8E-04	1E-02	15	80	4E-03	3E-03	6E-04	8E-03
Titane	15	100	6E+01	3E+01	2E+01	1E+02	15	100	1E+01	1E+01	5E-01	4E+01
Tributylétain cation	15	53	3E-03	1E-03	2E-03	6E-03	15	20	2E-03	1E-03	5E-04	3E-03
Tributylphosphate (TBT)	15	73	1E-01	1E-01	4E-02	5E-01	15	60	7E-02	5E-02	2E-02	1E-01
Trichlorobenzène (TCB)	15	53	1E-01	6E-02	4E-02	2E-01	15	53	5E-02	2E-02	3E-02	9E-02
Trichlorométhane (chloroforme)	15	100	3E+00	6E+00	1E-01	2E+01	15	73	2E+00	4E+00	1E-01	1E+01
Trifluraline	15	60	2E-02	1E-02	4E-03	3E-02	15	0				
Triméthoprim	5	100	2E-01	8E-02	7E-02	3E-01	5	100	2E-01	8E-02	7E-02	3E-01
Tylosine	5	60	5E-02	8E-02	0E+00	2E-01	5	100	2E-02	3E-02	3E-03	7E-02
Valsartan	6	100	1E+01	7E+00	2E+00	2E+01	6	100	5E+00	7E+00	4E-01	2E+01
Venlafaxine	6	83	2E-01	1E-01	0E+00	4E-01	6	83	1E-01	2E-01	0E+00	4E-01
Zinc (métal total)	15	100	1E+02	6E+01	1E+01	2E+02	15	100	4E+01	2E+01	8E+00	8E+01

Le code couleurs concerne les substances prioritaires de la directive cadre eau [EC, 2013] ; jaune = substance prioritaire DCE ; rouge = substance dangereuse prioritaire ; vert = substances spécifiques de l'état écologique [MEEDM, 2010b]. En gras : les substances qui présentent des concentrations potentiellement supérieures à la norme de qualité environnementale NQE (proposée ou actuelle).

Tableau I. Exemple de substances retrouvées dans les eaux usées domestiques brutes à une fréquence de quantification (Freq) supérieure à 50 %. Résultats du projet Amperes et de l'étude d'AGBAR (concentrations en µg/L dans les eaux brutes et les eaux traitées de 15 stations d'épuration)

des plastifiants (diéthylhexylphthalate), des composés volatils (COV) (tels le chloroforme, le dichlorométhane), des hydrocarbures polycycliques aromatiques (fluoranthène, naphtalène), des organoétains...

Parmi les substances non réglementées, on trouve les hormones estrogènes classiques dérivées de l'estradiol, de nombreux médicaments et quelques-uns de leurs sous-produits (par exemple carbamazépine époxyde,

4-OH-oméprazole), des agents de contraste iodés (diatrizoate, iohexol, iopromide). Les médicaments quantifiés appartiennent à des classes thérapeutiques très variées. Ils sont utilisés en médecine humaine, mais certains d'entre eux sont à usage purement vétérinaire (sulfaméthazine, tylosine). De plus, de nombreux métaux non listés dans la DCE sont également trouvés en fréquence élevée (aluminium, argent, baryum, bore, étain, fer, lithium, rubidium, titane).

2.2. Choix d'indicateurs d'influence des STEU sur le milieu récepteur

Comme discuté précédemment, pour un indicateur destiné à contrôler l'impact d'une station d'épuration sur le milieu récepteur, sa concentration en eau traitée devra être significative (voir plus haut note 3) par rapport à son impact potentiel, généralement exprimé par la norme de qualité environnementale (NQE). Ainsi, par exemple, le diuron (0,2 µg/L en moyenne en eau traitée) a une concentration dans les eaux usées brutes proches du niveau de sa NQE exprimée en moyenne annuelle ; c'est pourquoi il sera un meilleur choix que l'atrazine (0,02 µg/L en eau traitée) qui est largement en dessous de sa NQE de 0,6 µg/L. Certaines substances présentes à des niveaux très faibles (cation tributylétain : 2 ng/L avec une fréquence de quantification de 20 % en eau traitée) peuvent être néanmoins présentes à des concentrations largement supérieures à leur NQE actuelle (0,2 ng/L pour le tributylétain) [EC, 2013], ou proposée – même si elle n'a pour l'instant pas été retenue (exemple : 0,4 ng/L pour le 17β-estradiol : (COM [2011], 876 final). Les substances susceptibles de présenter un problème par rapport à leur NQE – actuelle ou proposée – sont indiquées en gras dans le *tableau I*. Malgré leur faible présence en entrée de STEU (Freq < 50 %) et leur apparente absence dans les eaux traitées, le pentabromodiphényléther et l'hexabromodiphényléther ont été inclus dans cette catégorie du fait de leur NQE proposée dans les drafts de la directive 2013/39/EU extraordinairement basse : $4,9 \cdot 10^{-8}$ µg/L pour la somme des congénères BDE 28 (tribromodiphényléther), 47 (tétrabromo), 99, 100 (pentabromo), 153 et 154 (hexabromo), niveau qui paraît analytiquement inaccessible actuellement et pour les années qui viennent.

Le *tableau I* comporte d'autres indicateurs potentiels d'influence sur le milieu, en particulier l'estradiol et l'éthinylestradiol qui sont présents pratiquement systématiquement dans les eaux usées urbaines et qui ont fait l'objet d'une proposition de NQE très faible, de même que le diclofénac, qui est assez mal éliminé par biodégradation. En ce qui concerne la sélection d'un traceur conservatif de l'influence des eaux résiduaires urbaines sur le milieu, du fait de l'absence de données dans les études ci-dessus sur le gadolinium et pour sa plus grande facilité d'analyse, le bore

– retrouvé entre 70 et 400 µg/L en sortie des stations d'épuration étudiées – demeure notre premier choix.

3. Comportement des micropolluants au cours des principaux procédés d'épuration

3.1. Biodégradation ou adsorption

Le projet européen Poséidon⁶, focalisé sur le devenir des médicaments et de quelques cosmétiques dans le cycle de l'eau, a entre autres permis d'étudier le devenir d'une vingtaine de composés dans des STEU ayant divers types de réacteurs biologiques (boues activées, bioréacteurs à membranes (BRM), lits fixés), et de distinguer l'élimination due à la dégradation biologique de celle due à l'adsorption sur les boues. Ces données ([TERNES et JOSS, 2006], chapitre 6) sont résumées dans le *tableau II*.

Le *tableau II* confirme la mauvaise élimination de l'éthinylestradiol et du diclofénac et donc leur intérêt en tant qu'indicateurs de l'influence des STEU sur le milieu. Parmi les composés qui s'adsorbent bien sur les boues, on retrouve les muscs tonalide et galaxolide ; et également quelques antibiotiques, tels que la ciprofloxacine et la norfloxacine, qui se trouvent en conséquence à des niveaux assez faibles dans les effluents. L'azithromycine et la clarithromycine, qui ne sont ni biodégradés ni adsorbés, sont des indicateurs potentiels pour des traitements complémentaires, à condition que leur fréquence d'apparition dans les eaux usées soit élevée. Cela semble être le cas pour ces deux substances, au moins pour les cinq eaux résiduaires espagnoles étudiées par AGBAR (*tableau I*). Du fait de sa faible élimination, la carbamazépine a parfois été considérée comme un bon traceur d'eau résiduaire dans le milieu aquatique [NAKADA *et al.*, 2008]. Le 17β-estradiol est en revanche bien éliminé par biodégradation et son abattement peut donc constituer un bon indicateur d'un traitement secondaire optimisé.

3.2. Élimination de substances prioritaires et émergentes en traitements primaire, secondaire et complémentaires (tertiaire)

Les résultats du projet Amperes, qui portait sur l'étude du comportement des substances prioritaires

⁶ EU Project Poseidon Contract EVK1-CT-2000-00027, 2000-2004.

Substances	Âge de boues (j)	Transformation biologique (%)	Adsorption sur la boue (%)	% restant dans l'effluent
Azithromycine	10-30	< 40	< 10	> 90
Ciprofloxacine	10-12	< 10	70-80	≤ 30
Clarithromycine	< 20	< 10	< 5	75-90
Norfloxacine	10-12	< 10	80-90	≤ 20
Roxithromycine	4-30	< 60	< 5	> 35
Sulfaméthoxazole	4-12	50-90	< 5	10-50
Sulfapyridine	10-30	≤ 70	< 10	≥ 30
Triméthoprim	> 50	~90	≤ 5	~10
Estradiol	10-30	85-99	< 5	< 15
Estrone	10-30	35-97	≤ 5	5-60
Éthinylestradiol	10-30	45-95	≤ 5	5-60
Carbamazépine	4-60	< 40	< 5	> 60
Diclofénac	4-60	5-45	< 5	55-95
Ibuprofène	4-60	90-100	< 5	0-10
Iopromide	10-30	20-95	< 5	5-80
Naproxène	10-30	55-85	< 5	15-45
Tonalide	4-60	< 55	> 20	> 30
Galaxolide	10-30	< 55	> 10	> 30

Tableau II. Devenir de médicaments et cosmétiques dans des stations d'épuration domestiques (d'après Ternes et Joss [2006])

de la DCE et de nombreuses autres substances inorganiques et organiques, ont été synthétisés dans une série d'articles parus dans la revue *Techniques Sciences Méthodes*. Outre les fréquences de quantification dans les eaux brutes et traitées [COQUERY *et al.*, 2011] reprises dans le *tableau I*, on y trouve les rendements d'élimination des substances, global et par type de procédés, groupés en trois classes ($R < 30\%$, $30\% < R < 70\%$, $R > 70\%$), pour les substances prioritaires et quelques autres substances [CHOUBERT *et al.*, 2011]. Le même type de synthèse a été réalisé pour de nombreuses substances pharmaceutiques, quatre hormones estrogènes et deux stimulants [SOULIER *et al.*, 2011]. Des règles strictes relatives à la proximité des concentrations (eaux usées brutes et traitées) par rapport à la LQ ont été appliquées pour ne calculer que des rendements d'élimination robustes. Compte tenu de la richesse des résultats, seuls quelques fragments de ces synthèses sont insérés ici pour illustrer le type de données disponibles. Le *tableau III* montre le comportement de quelques substances prioritaires dangereuses et émergentes en fonction de différents procédés de traitement.

Le code couleur (rouge, jaune, vert) se rapporte au rendement d'élimination des substances avec les trois classes mentionnées ci-dessus. Les cases grises indiquent les traitements pour lesquels le rendement n'a pas pu être calculé. Un marqueur de traitement adapté devrait dans l'idéal avoir un rendement qui s'améliore (gradation du rouge vers le jaune, puis vers le vert) en fonction du degré de sophistication du procédé, ce qui semble être le cas du benzothiazole et du tributylphosphate (*tableau V*). Le benzothiazole, présent en concentrations plus élevées dans les eaux usées, semblerait plus indiqué que le tributylphosphate.

D'autres substances, comme le bore ou le lithium, montrent un mauvais rendement ($< 30\%$) quel que soit le procédé primaire ou secondaire. De par sa fréquence de quantification élevée et sa concentration élevée en entrée et en sortie de STEU (entre 100 et 1 000 µg/L), sa facilité d'analyse, le fait qu'il soit éliminé partiellement seulement par des traitements complémentaires (osmose inverse et charbon actif), le bore reste un très bon candidat indicateur d'une eau naturelle influencée par les rejets de STEU, même s'il peut présenter un fonds géochimique non négligeable

Substance		Traitements primaires		Traitements secondaires (zones urbaines)							Traitements secondaires (zones rurales)						
				C seul		C + N											
		DP	DP physico-chimique	DP + BA moyenne charge	DP physico-chimique + biofiltre 1 étage	BA aération prolongée	DP + BA moyenne charge + biofiltre 1 étage	DP + MBBR	Bioréacteur à membranes	DP physico-chimique + biofiltre 2 étages	DP + BA aération prolongée	Filtre planté écoulement vertical	Biodisque + filtre écoulement vertical	DP + lagune	Lit bactérien + filtre écoulement vertical	DP + lagune + filtre écoulement vertical	
Substances prioritaires dangereuses	Cadmium (Cd)																
	Benzo(b)fluoranthène																
	4-NP (nonylphénols)																
	Benzo(k)fluoranthène																
	Indéno(1,2,3-cd) pyrène																
	Mercure (Hg)																
	C10-13 chloroalcanes																
	Pentabromodiphényléther																
	Pentachlorobenzène																
	Anthracène																
	Benzo(a)pyrène																
	Benzo(g,h,i)pérylène																
Autres substances	Monochlorophénols																
	Dichlorophénols																
	Bisphénol A																
	Décabromodiphényléther																
	Benzothiazole																
	Tributylphosphate																
	4-NP1EO																
	4-tert-butylphénol																

< 30 %

30 à 70 %

> 70 %

Rendement non calculable

■ < 30 %
 ■ 30 à 70 %
 ■ > 70 %
 ■ Rendement non calculable

DP : décantation primaire ; BA : boues activées ; MBBR : procédé à culture fixée sur support mobile (*moving bed bio-reactor*).

Tableau III. Rendements d'élimination de substances prioritaires et émergentes lors de différents procédés de traitement ; extrait des résultats du projet Amperes [Choubert *et al.*, 2011]

suivant le type de roches du bassin versant [BRGM, 2005]. Le diuron a également un comportement intéressant : il n'est pas éliminé par les traitements primaires et secondaires et il discrimine bien les traitements complémentaires conventionnels des traitements avancés : mal éliminé (< 30 %) par décantation rapide, filtration sur sable ou lagunage de finition, le diuron est bien éliminé (> 70 %) par ozonation, filtration sur charbon et osmose inverse. Il a une fréquence de quantification élevée, une concentration suffisante (comprise entre 0,1 et 1 µg/L) en sortie de traitement secondaire et il est relativement simple à analyser. Il constitue l'archétype de la

substance capable de qualifier l'efficacité d'un traitement complémentaire avancé.

Le mercure, de fréquence élevée, est moyennement éliminé par les traitements primaires (30-70 %), mais bien éliminé (> 70 %) par les traitements secondaires. Il pourrait donc servir à qualifier l'efficacité de ces derniers. Si l'on cherche dans les données du projet Amperes des composés bien éliminés par les traitements primaires, on trouve essentiellement les C10-C13 chloroalcanes, et le titane, présent à des niveaux significatifs (10-100 µg/L) [COQUERY *et al.*, 2011] et en fréquence élevée.

Le projet Poseidon a également étudié le devenir de médicaments, hormones, cosmétiques lors de procédés

de production d'eau potable envisagés pour le traitement complémentaire des eaux résiduaires. Les hormones œstrogènes sont très bien éliminées par l'ozonation et l'adsorption sur charbon. En ozonation, il a été montré qu'elles sont éliminées très rapidement, avant que la demande en ozone ne soit satisfaite, et que leur activité œstrogénique disparaît. D'une façon générale, les antibiotiques sont bien éliminés par les mêmes traitements, même si un projet récemment achevé au Cirsee montre que certains d'entre eux (par exemple la danofloxacin, un antibiotique vétérinaire) peuvent traverser des chaînes de traitement comportant un couplage ozone/charbon actif en grain (CAG). À l'inverse, les agents de contraste iodés sont réfractaires aux traitements d'oxydation et ne sont que partiellement éliminés par le charbon actif. L'étude des constantes cinétiques d'oxydation et des temps de demi-vie de neuf médicaments en présence de trois oxydants, ozone, chlore et bioxyde de chlore, a montré les résultats suivants ([TERNES et JOSS, 2006], chapitre 7) : en ce qui concerne l'ozone, la carbamazépine, le diclofénac, l'éthinylestradiol, la roxithromycine et le sulfaméthoxazole ont des demi-vies inférieures ou égales à 1 seconde. Le bézafibrate a une demi-vie de l'ordre de 1 minute ; celle-ci est voisine de 1 heure pour l'ibuprofène, et de 1 jour pour le diazépam et l'iopromide. Ces deux derniers composés peuvent donc être considérés comme réfractaires à l'oxydation.

La roxithromycine est probablement présente à un niveau trop faible dans les eaux résiduaires (*tableau I*, données Amperes sur 15 stations) pour jouer le rôle d'indicateur.

En ce qui concerne l'adsorption sur charbon activé, pour des eaux ayant une concentration de carbone organique dissous (COD) entre 1,0 et 1,5 mg/L, 5 mg de charbon en poudre ont permis d'atteindre une élimination de 90 %, tandis que 10-15 mg/L ont permis d'atteindre une élimination de 99 % ([TERNES et JOSS, 2006], chapitre 7). Il existe cependant des différences observables entre les composés lors de la réalisation d'isothermes d'adsorption. Ainsi, pour une cible de 99 % d'élimination, l'adsorbabilité de la carbamazépine, de la roxithromycine, de l'iopromide, de l'ibuprofène, de l'atrazine est nettement supérieure

à celle du sulfaméthoxazole pour lequel il faudra des doses de charbon plus élevées. La carbamazépine et le sulfaméthoxazole pourraient donc constituer deux bons indicateurs de comportements différents en adsorption sur charbon actif.

3.3. Comportement de substances émergentes dans les STEU

L'accent mis ces cinq dernières années sur les substances prioritaires de la DCE et sur les substances émergentes (exemple : médicaments, hormones) présente l'inconvénient d'occulter des substances importantes recherchées autrefois. Ainsi, N'GUYEN et coll. [1994] avaient mis en évidence plus de 150 contaminants organiques en utilisant un schéma analytique complexe, dans l'eau brute de la station d'Asnières-sur-Oise. Le micropolluant le plus abondant était les alkylbenzènes sulfonates linéaires (LAS) quantifiés à près de 6 mg/L. Des agents complexants (NTA, EDTA) ainsi que des stérols étaient présents à près de 0,5 mg/L. Parmi les autres substances qui ressortaient, on peut citer des éthers de glycols, des terpènes, des phtalates et stérols autres que les hormones estrogènes, les hydrocarbures et la caféine. Ainsi, les LAS, détergents anioniques les plus abondants, qui sont relativement bien biodégradés, pourraient être un bon candidat comme traceur de biodégradation. La caféine se trouvait également à des concentrations élevées dans l'eau usée brute ; elle était totalement éliminée par la STEU, ce qui justifie le fait qu'elle soit parfois utilisée comme indicateur d'eaux usées non traitées [Peeler et al., 2006].

Au cours de la dernière décennie, l'avènement de la technique de chromatographie bidimensionnelle a permis de découpler le pouvoir de séparation de la chromatographie gazeuse. Cette technique a permis la détection de plus de 1 000 substances dans une eau résiduaire brute [SEMARD et al., 2008], parmi lesquelles des médicaments, cosmétiques, anti-UV, des solvants et des additifs de plastiques. La simple comparaison du nombre de pics détectés au-dessus d'un certain rapport signal/bruit avant et après traitement peut mettre en lumière le degré d'efficacité du traitement. Par exemple, SEMARD et coll. [2008] ont observé une élimination de 90 % des pics détectés avec un rapport signal/bruit > 10 lors d'un traitement

par boues activées. Après une phase de *screening* non ciblé, un travail plus quantitatif a été réalisé par SEMARD [2009] en utilisant des substances de référence pures. Les résultats obtenus sur six stations d'épuration, sont partiellement reportés dans le *tableau IV*.

Ces résultats démontrent la fréquence et l'importance de substances telles que le phénol et le p-crésol (utilisés comme intermédiaires de synthèse, mais pouvant aussi provenir de la dégradation de la tyrosine), de l'eucalyptol (terpène), du benzaldéhyde, du propylparaben (conservateur ajouté dans les cosmétiques et médicaments), de la coumarine (précurseur d'anti-coagulants), du chlorure de benzyle, de l'indole (qui peut provenir de la dégradation du tryptophane) et de la nicotine. On note, par ailleurs, des comportements bien différents entre le phénol, le p-crésol, l'indole, l'eucalyptol (très bien éliminés, > 80 %), le benzaldéhyde (moyennement éliminé, 65-70 %) et le chlorure de benzyle (mal éliminé, de 0 à 65 %). Ce dernier composé semble pouvoir discriminer l'efficacité des procédés étudiés puisque le 0 % d'élimination est observé avec un lit bactérien (STEP 4), tandis que les stations à boues activées ou BRM (STEP 1,2,3,5 et 6) conduisent à une élimination de 33 à 65 %.

3.4. Choix d'indicateurs d'efficacité de traitements primaire, secondaire et complémentaires (tertiaires)

Parmi les indicateurs potentiels d'efficacité du traitement primaire, le titane est préféré au mercure et aux C10-C13 chloroalcane. Le mercure est en effet un peu plus difficile à mesurer que les autres métaux, car il est sujet à contamination du fait de sa présence à de faibles concentrations (quelques ng/L en phase dissoute) ; aussi, des conditions strictes de prélèvement et prétraitement des échantillons doivent être respectées et il doit être analysé par une méthode spécifique [CHANDESRIIS *et al.*, 2013]. Les chloroalcane sont difficiles à mesurer car nécessitant une méthode d'ionisation chimique en couplage chromatographie gazeuse-spectrométrie de masse (GC-MS) et un étalonnage par une méthode multivariée (ISO/DIS 18635).

Parmi les indicateurs potentiels des traitements secondaires, le 17 β -estradiol est préféré aux LAS beaucoup moins toxiques. Bien que son élimination biologique soit très importante, l'ibuprofène qui est présent en concentrations élevées dans les eaux brutes est toujours mesurable dans les eaux issues des

	STEP 1		STEP 2		STEP 3		STEP 4		STEP 5		STEP 6	
	EB	ET	EB	ET	EB	ET	EB	ET	EB	ET	EB	ET
Chlorure de benzyle	1954	597	4 678	1 649	2 562	1 725	2 551	2 539	4 042	2 576	799	338
Hexyl salicylate	8 461	43	793	18	13 312	< 10	442	11	2 235	< 10	61	< 10
Phénol	7 173	112	9 661	240	97 364	138	1 299	< 50	34 338	141	4 574	120
p-crésol	23 165	< 50	19 967	< 50	81 150	95	< 100	< 50	3 173	198	12 982	< 50
Benzaldéhyde	1 294	390	1 349	390	1 238	797	2 403	672	1 246	476	644	207
Eucalyptol	12 201	< 5	945	26	2 045	53	14 258	676	936	< 5	6 691	< 5
Terpin	397	< 50	< 100	< 50	< 100	< 50	< 100	< 50	< 100	< 50	883	< 50
Coumarine	5 557	< 50	1 591	< 50	885	55	1 016	< 50	961	< 50	195	< 50
Propylparaben	< 200	< 100	505	< 100	4 163	< 100	3 193	< 100	1 499	< 100	582	< 100
N,N- diéthyl-méta-toluamide (DEET)	146	105	404	21	503	46	52	45	662	389	37	20
Indole	3 432	< 50	543	< 50	35 189	< 50	3 505	< 50	2 963	107	1 273	< 50
Dibutyl phtalate	515	361	1 268	741	3 435	382	555	235	1 753	917	1 066	217
Acétophénone	566	125	761	220	788	363	278	125	384	104	245	49

EB : eaux usées brutes ; ET : eaux usées traitées ; échantillons non filtrés.

Tableau IV. Résultats d'une recherche semi-quantitative de substances non ciblées dans six STEU, de type boues activées (STEP 1, 2, 5, 6), bioréacteur à membrane (STEP 3) et lit bactérien (STEP 4) (d'après Semard [2009]). En ng/L

traitements secondaires et pourra donc être réservé comme indicateur de traitement complémentaire. La ciprofloxacine et la norfloxacine qui sont plus des indicateurs d'adsorption sur les boues que de biodégradation, ne sont pas retenues. De même, le tributylphosphate et le benzothiazole, qui sont des composés ubiquistes assez bien éliminés par les traitements secondaires, n'ont pas été retenus pour des raisons analytiques (fréquence de détection dans les blancs). Le chlorure de benzyle qui semble présent de façon fréquente et à des niveaux élevés dans les effluents urbains français (*tableau IV*) a été préféré à d'autres substances synthétiques. Ce composé est utilisé principalement pour la synthèse d'ammoniums quaternaires de type benzalkonium et est considéré comme bien biodégradable [ENVIRONNEMENT CANADA, 2009]. Son omniprésence dans les eaux résiduaires urbaines apparaît donc logique du fait de l'importante utilisation des ammoniums quaternaires en tant que détergents cationiques. Sa classification par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) comme cancérigène probable chez l'homme (groupe 2A) rend également indésirable sa dissémination dans les ressources en eaux potables.

Parmi les indicateurs potentiels de traitements complémentaires, les antibiotiques (exemple : azithromycine, clarithromycine, érythromycine), qui sont sujets à des effets de matrice lors de leur analyse dans des matrices chargées, ont été écartés. L'éthinylestradiol a été écarté au profit du 17 β -estradiol qui se trouve en concentrations plus élevées dans les eaux usées [JANEX-HABIBI *et al.*, 2009] et a le même comportement en ozonation. Outre cette hormone, trois autres indicateurs d'oxydation facile sont retenus (carbamazépine, diclofénac et sulfaméthoxazole), tandis que l'ibuprofène constituera un indicateur d'une oxydation plus difficile, donc optimisée. Enfin, la carbamazépine (facilement adsorbable) et le sulfaméthoxazole (difficilement adsorbable) ont été retenus pour leur comportement différent

en traitement complémentaire sur charbon actif. À l'inverse, la caféine, composé classiquement éliminé totalement par les STEU, n'est pas retenue, car sa présence en effluent traité ou dans le milieu constituerait plus un indicateur de dysfonctionnement ou d'absence de traitement, qu'un indicateur d'efficacité. On notera que certains composés peuvent servir d'indicateurs à différentes étapes : ainsi le diuron, qui est relativement bien éliminé par ozonation et adsorption sur charbon, mais qui est souvent détecté au-dessus de sa NQE en sortie des stations conventionnelles, pourra servir d'indicateur, à la fois pour qualifier ces étapes de traitement complémentaires, et en tant qu'indicateur d'influence sur le milieu récepteur.

Conclusions

En conclusion, nous proposons en première approche une liste maximale de dix indicateurs, reportée dans le *tableau V*.

Les résultats Armistiq sur les traitements complémentaires (tertiaires) intensifs confortent cette classification et choix d'indicateurs (articles de Besnault *et coll.* de ce numéro *TSM*). La liste proposée est plus importante que la première liste suisse, car elle se veut indicatrice de plus de situations ; en effet, elle comprend :

- Un indicateur conservatif de l'influence d'eaux résiduaires sur les eaux naturelles, le bore.

Substance ou paramètre	Traitement primaire	Traitement secondaire	Traitement par ozonation	Traitement par adsorption sur charbon actif	Indicateur milieu récepteur ou influence eaux usées
Titane	X				
Bore	–	–	– ^(a)	– ^(a)	+
17 β -estradiol	–	X	X	X	+
Carbamazépine	–	–	X	X	+
Sulfaméthoxazole	–	M	X	–	
Diclofénac	–	–	X	–	+
Ibuprofène	–	X	M	X	
Diuron	–	–	X	X	+
Chlorure de benzyle	–	X	ND	ND	
UV254	ND	ND	X	ND	

X : Bien éliminé ; M : élimination moyenne ; – : élimination faible ; ND : non déterminé ou non renseigné ; + : indicateur proposé.

^(a) : selon les résultats du projet Armistiq sur les procédés de traitement complémentaire intensifs présentés dans ce numéro *TSM* (Besnault *et al.*)

Tableau V. Liste des dix indicateurs proposée

- Un indicateur de bon fonctionnement d'un traitement primaire, le titane.
- Une hormone estrogène, le 17 β -estradiol, bien éliminée par les traitements secondaires et complémentaires, mais qui peut avoir des effets sur la faune aquatique à très faibles concentrations ; et qui de ce fait, a fait l'objet d'une proposition de NQE à 0,4 ng/L. Cette hormone naturelle a été préférée à son homologue synthétique l' α -éthinyloestradiol qui est présent à des niveaux plus faibles, et dont la NQE proposée (0,04 ng/L) demeure inférieure aux limites de quantification des méthodes analytiques publiées [JANEX-HABIBI *et al.*, 2009 ; MIÈGE *et al.*, 2009].
- Quatre médicaments représentatifs de différentes classes thérapeutiques qui sont tous mal éliminés par les traitements secondaires. Le diclofénac est le premier médicament qui a fait l'objet d'une proposition de NQE à 0,1 ng/L ; il a donc pour vocation de servir d'indicateur de qualité environnementale. Avec le diclofénac, la carbamazépine et le sulfaméthoxazole sont faciles à éliminer par des procédés de traitement complémentaire de type ozonation, tandis que l'ibuprofène est plus difficile à oxyder. Ce dernier constituera donc un indicateur de conditions d'ozonation bien optimisées. À l'inverse, le sulfaméthoxazole et le diclofénac sont représentatifs de substances plus difficiles à adsorber sur charbon actif que la carbamazépine et l'ibuprofène. Il convient de rappeler que la bonne élimination (> 80 %) de la carbamazépine et du diclofénac semble garantir lors des traitements complémentaires une bonne élimination (> 80 %) de nombreux autres micropolluants très couramment retrouvés dans les eaux usées brutes et secondaires.
- Un paramètre non spécifique facile à mesurer, l'absorbance UV à 254 nm. Il a été montré que le bon abattement de ce paramètre lors de l'ozonation d'eau résiduaire est un indicateur d'une ozonation optimisée et d'une bonne réduction de substances difficiles à oxyder.
- Un pesticide, le diuron, qui a pour double vocation de servir d'indicateur de qualité environnementale

(en dehors de situations d'apport par des activités agricoles) et d'indicateur de bon fonctionnement de traitements avancés.

- Une substance d'origine industrielle retrouvée dans tous les effluents de six stations d'épuration françaises [SEMARD, 2009], le chlorure de benzyle. Même en l'absence de données sur son comportement en ozonation et adsorption, ce composé a été préféré à d'autres indicateurs possibles comme le propylparaben, produit chimique d'usage domestique, ou la coumarine qui semblent être déjà très bien éliminés par les traitements secondaires (tableau IV) ou le DEET qui est présent à des niveaux un peu plus faibles.

La plupart des indicateurs proposés sont *a priori* plutôt faciles à mesurer (y compris en ligne pour l'absorbance UV). Il existe des kits Elisa pour le 17 β -estradiol et le diuron, mais ils ne sont pas assez sensibles pour détecter les traces qui pourraient subsister en sortie de traitements avancés.

Il est clair que la liste des substances retenue est influencée par les limites des méthodes analytiques utilisées dans le cadre des études prises en compte : sélection *a priori* de listes de composés ciblés ne pouvant refléter toute la diversité des substances présentes dans les effluents. La liste proposée ne peut donc être définitive et sa pertinence devra être validée par la mesure conjointe des indicateurs proposés et la mise en œuvre de méthodes de *screening* non ciblé (chromatographie gazeuse bidimensionnelle, couplage chromatographie liquide-spectrométrie de masse à haute résolution), voire la réalisation de tests biologiques. Les résultats du projet Echibioteb⁷ permettront notamment d'examiner les effets toxiques, qui peuvent être réduits ou au contraire exacerbés, après ces traitements, et comparer l'applicabilité et la complémentarité des outils chimiques et biologiques. En ce qui concerne l'applicabilité géographique de ces indicateurs, s'il est vrai que l'essentiel des données examinées proviennent de France et à un degré moindre d'Europe et des États-Unis, la littérature nous indique que toutes les substances proposées ont été reportées, ou sont utilisées, de façon universelle. Ces indicateurs sont donc utilisables dans tous les pays industrialisés.

⁷ Echibioteb : Projet ANR Ecotech 2010, « outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi des traitements avancés des eaux usées et des boues » (<http://echibioteb.irstea.fr>)

Bibliographie

- BRGM (2005) : *Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône-Méditerranée et Corse*. Rapport de phase 1. BRGM/RP-54031-FR.
- CHANDESRI A., CANAL J., BOUGON N., COQUERY M. (2013) : *Détermination du fond géochimique pour les métaux dissous dans les eaux continentales*. Rapport final. Irstea. 65 p. + annexes [231 p.].
- CHOUBERT J.-M., MARTIN-RUEL S., BUDZINSKI H., MIÈGE C., ESPERANZA M., SOULIER C., *et al.* (2011) : « Évaluer les rendements des stations d'épuration. Apports méthodologiques et résultats pour les micropolluants en filières conventionnelles et avancées ». *TSM* ; 1/2 : 44-62.
- COM (2011) : 876 final. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Brussels, 31.1.2012.
- COQUERY M., POMIES M., MARTIN-RUEL S., BUDZINSKI H., MIÈGE C., ESPERANZA M., *et al.* (2011) : « Mesurer les micropolluants dans les eaux usées brutes et traitées. Protocoles et résultats pour l'analyse des concentrations et des flux ». *TSM* ; 1/2 : 25-43.
- DICKENSON E.R., DREWES J.E., SEDLAK D.L., WERT E.C., SNYDER S.A. (2009) : « Applying surrogates and indicators to assess removal efficiency of trace organic chemicals during chemical oxidation of wastewaters ». *Environ. Sci. Technol.* ; 43 : 6242-6247.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2009) : Évaluation préalable pour le défi concernant le α -chlorotoluène (chlorure de benzyne).
- EC (2013). Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau, 17 p.
- GLASSMEYER S.T., FURLONG E.T., KOLPIN D.W., CAHILL J.D., ZAUGG S.D., WERNER S.L., *et al.* (2005) : « Transport of chemical and microbial compounds from known wastewater discharges: potential for use as indicators of human fecal contamination ». *Environ. Sci. Technol.* ; 39 : 5157-5169.
- GÖTZ C.W., ABEGGLEN C., MCARDLE C.S., KOLLER M., SIEGRIST H., HOLLENDER J., SCHÄRER M. (2010) : « Mikroverunreinigungen. Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorensubstanzen ». *GWA Gas, Wasser, Abwasser* ; 90 (4) : 325-333.
- ISO/DIS 18635. *Qualité de l'eau – Détermination des alcanes polychlorés à chaîne courte dans les sédiments et matières en suspension (particules) – Méthode par chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse (GC-SM) avec ionisation chimique négative (ICN)*.
- JANEX-HABIBI M.L., HUYARD A., ESPERANZA M., BRUCHET A. (2009) : « Reduction of endocrine disruptor emissions in the environment: the benefit of wastewater treatment ». *Water Research* ; 43 : 1565-1576.
- LANGE F.T., SCHEURER M., HAPPEL O., STORCK F.R., BRAUCH H.-J. (2011) : « Artificial sweeteners: versatile anthropogenic wastewater tracers and their behavior in water treatment including formation of reaction products with ozone ». Abstract presented at the *Micropoll and Ecohazard conference*, Sydney, July 11-13, 2011.
- LAWRENCE M.G., BARIEL D.G. (2010) : « Tracing treated wastewater in an inland catchment using anthropogenic gadolinium ». *Chemosphere* ; 80, 794-799.
- LOOS R., GAWLIK B.M., BOETTCHER K., LOCORO G., CONTINI S., BIDOGLIO G. (2009) : « Sucralose screening in European surface waters using a solid-phase extraction-liquid-chromatography-triple quadrupole mass spectrometry method ». *Journal of Chromatography A* ; 1216 : 1126-1131.
- MEEDM – Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (2010a) : *Plan Micropolluants 2010-2013*. 13 octobre 2010.
- MEEDM (2010b) : 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. *JORF* ; n° 0046 du 24 février 2010, page 3429.
- MIÈGE C., BADOS P., BROSSE C., COQUERY M. (2009) : « Method validation for the analysis of estrogens (including conjugated compounds) in aqueous matrices ». *Trends in Analytical Chemistry* ; 28, 2 : 237-244.
- MULLOT J.-U. (2009) : *Modélisation des flux de médicaments dans les effluents hospitaliers*. Thèse de doctorat, université Paris-Sud 11.
- NAKADA N., KIRI K., SHINOHARA, H., HARADA A., KURODA K., TAKIZAWA S., TAKADA H. (2008) : « Evaluation of pharmaceuticals, and personal care products as water-soluble molecular markers of sewage ». *Environ. Sci. Technol.* ; 42 : 6347-6353.
- N'GUYEN D.-K., BRUCHET A., ARPINO P. (1994) : « High resolution capillary GC-MS analysis of low molecular weight organic compounds in municipal wastewater ». *Journal of High Resolution Chromatography* ; 17 : 153-159.
- OFEV (2009) : *Déversement de substances organiques en traces dans les eaux. Rapport explicatif relatif à la modification de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)*. Confédération Suisse. Office fédéral de l'environnement. Projet du 18 novembre 2009.
- OFEV (2011) : *Traitement des micropolluants dans les eaux usées. Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne)*. Confédération Suisse. Office fédéral de l'environnement. Lausanne, Janvier 2011. Éditeur : Ville de Lausanne.
- PEELER K.A., OPSAHL S.P., CHANTON J.P. (2006) : « Tracking anthropogenic inputs using caffeine, indicator bacteria, and nutrients in rural freshwater and urban marine systems ». *Environmental Science and Technology* ; 40, 24 : 7616-7622.

R+i ALLIANCE (2009) : *Pharmaceuticals and drugs of abuse in water resources and wastewater*. Internal Report, Project code HE607.

SCHEURER M., STORCK F.R., BRAUCH H.J., LANGE F.T. (2010) : « Performance of conventional multi-barrier drinking water treatment plants for the removal of four artificial sweeteners ». *Water Research* ; 44, 12 : 3573-3584.

SEMARD G., BRUCHET A., CARDINAËL P., BOUILLON J.-P. (2008) : « Use of comprehensive two-dimensional gas chromatography for the broad screening of hazardous contaminants in urban wastewaters ». *Water Science and Technology* ; 57, 12 : 1983-1989.

SEMARD G. (2009) : *Recherche et quantification de substances cibles et émergentes dans les eaux résiduaires à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse bidimensionnelle*. Thèse. Université de Rouen, UFR des sciences et techniques. Laboratoire SMS EA 3233.

SOULIER C., GABET V., LARDY S., LEMENACH K., PARDON P., ESPERANZA M., et al. (2011) : « Zoom sur les substances pharmaceutiques : présence, partition, devenir en station d'épuration ». *TSM* ; 1/2 : 63-77.

TELGEMANN L., WEHE C.A., BIRKA M., KÜNNEMEYER J., NOWAK S., SPERLING M., KARST U. (2012) : « Speciation and isotope dilution analysis of gadolinium-based contrast agents in wastewater ». *Environmental Science and Technology* ; 46 : 11929-11936.

TERNES T.A., JOSS A. (2006) : *Human pharmaceuticals, hormones and fragrances. The challenge of micropollutants in urban water management*. Londres, IWA Publishing.

USEPA (1974) : « Analysis of coprostanol an indicator of fecal contamination ». EPA-660/2-74-021. *Environmental protection technology series*. Office of research and development. US. Environmental Protection Agency. Washington D.C., 20460.

Résumé

A. BRUCHET, S. MARTIN, M. COQUERY

Indicateurs chimiques d'efficacité de traitement et d'influence des rejets de stations d'épuration sur le milieu récepteur

Cet article présente une démarche qui a permis d'aboutir à la sélection d'une dizaine d'indicateurs chimiques d'efficacité de traitement des rejets de station d'épuration des eaux usées domestiques et de qualité chimique du milieu. La littérature sur la notion d'indicateur d'eaux résiduaires a tout d'abord été prise en compte. Les résultats d'études récentes portant sur la mesure et le comportement de micropolluants organiques et minéraux dans les rejets ont été ensuite synthétisés. Les

critères de sélection des micropolluants indicateurs comprennent la fréquence de quantification en entrée et en sortie de traitement secondaire, le comportement en matière d'élimination lors des procédés primaire, secondaire et complémentaire (ozone et charbon actif), et aussi les normes de qualité environnementale pour les indicateurs chimiques « milieu naturel ». Au final, une liste de neuf indicateurs chimiques et un paramètre global est proposée.

Abstract

A. BRUCHET, S. MARTIN, M. COQUERY

Chemical indicators of the efficiency of wastewater treatment and of the influence of effluent discharges on the aquatic environment

This article presents an approach that has led to the selection of 10 chemical indicators of the efficiency of urban wastewater treatment processes as well as of the quality of receiving waters. Literature dealing with the concept of wastewater indicators has first been taken into account. Results from recent studies reporting the occurrence and behavior of inorganic and organic micropollutants in sewage are then summarized.

Criteria for the selection of indicator micropollutants comprised their frequency of occurrence in raw sewage and at the outlet of secondary treatment, their removal during primary, secondary and tertiary (ozonation and activated carbon adsorption) processes, as well as environmental quality standards in receiving waters. Finally, a list of 9 chemical indicators as well as one non-specific parameter has been proposed.



FAURE
ÉQUIPEMENTS
ÉQUIPEMENTS
FAURE

La technologie grandeur nature



- ◆ Déshydratation des boues
- ◆ Procédé de filtration
- ◆ Fonctionnement sans présence humaine

Ingénierie
Service recherche et développement
Assistance technique

[www. faureequip.com](http://www.faureequip.com)



FAURE EQUIPEMENTS SA - Siège social et usine - ZI Magré - 21, rue Santos-Dumont
BP 52 - F-87002 LIMOGES CEDEX 1 - FRANCE
Tél.: +33 (0)5 55 30 12 60 - Fax : +33 (0)5 55 06 16 03 - E-mail : mail@faureequip.com