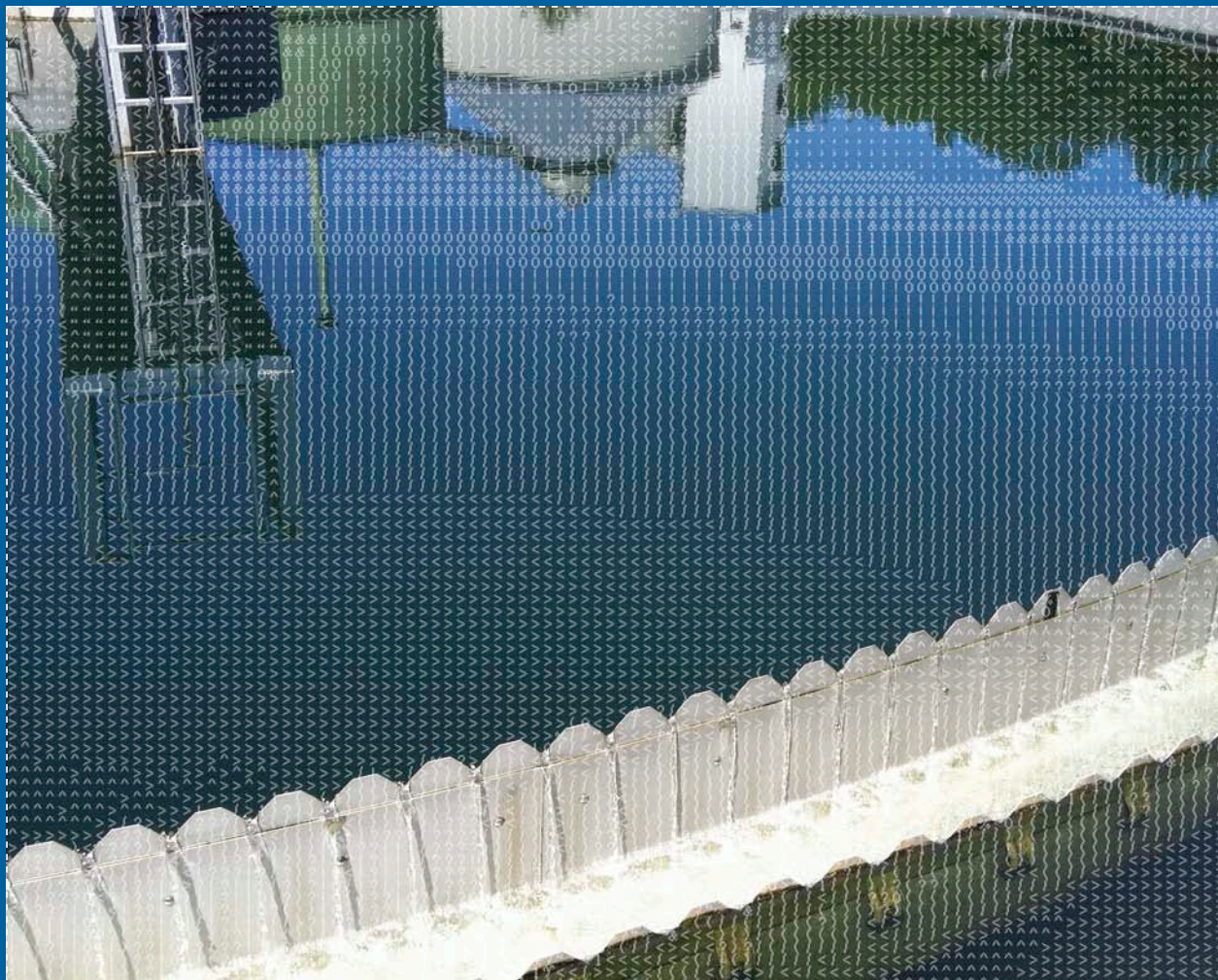


> Micropolluants dans les eaux usées urbaines

Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration



> Micropolluants dans les eaux usées urbaines

Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration

*Riassunto della presente pubblicazione: www.ambiente-svizzera.ch/uw-1214-i
Summary of this publication: www.environment-switzerland.ch/uw-1214-e*

Impressum

Editeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Christian Abegglen, Hansruedi Siegrist (Eawag)

Accompagnement à l'OFEV

Michael Schärer

Accompagnement de spécialistes

Marc Böhler, Juliane Hollender, Urs von Gunten, Saskia Zimmermann (Eawag), Damian Dominguez (OED BE), Christian Götz (Envilab), Cornelia Kienle (centre ecotox), Gerhard Koch (AIB), Sébastien Lehmann (OFEV), Pierre Liechti (IO3A), Ruedi Moser (Hunziker-Betatech), Daniel Rensch (AWEL ZH), Gerhard Ryhiner (WABAG), Denis Thonney (SIGE), Daniel Urfer (RWB),
Voir aussi remerciements page 73.

Référence bibliographique

Abegglen C., Siegrist H. 2012: Micropolluants dans les eaux usées urbaines. Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration. Office fédéral de l'environnement, Berne, Connaissance de l'environnement n° 1214: 87 p.

Graphisme, mise en page

Karin Nöthiger, Niederrohrdorf

Photo de couverture

Hansruedi Siegrist

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1214-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2012

> Table des matières

Abstracts	5	5 Coût et utilité des procédés supplémentaires d'épuration	48
Avant-propos	7	5.1 Objectifs, train de mesures et cadre international	48
Résumé	8	5.2 Eaux	50
<hr/>		5.3 Energie	54
1 Introduction	12	5.4 Coûts	57
1.1 Micropolluants	12	5.5 Constat	59
1.2 Projet «Stratégie Micropoll»	13	<hr/>	
1.3 Objectifs du rapport	15	6 Conclusions et perspectives	60
<hr/>		6.1 L'épuration des eaux usées aujourd'hui	60
2 Micropolluants provenant des eaux usées urbaines	16	6.2 Traitements supplémentaires	60
2.1 Substances actives	16	6.3 Conséquences pour les eaux	63
2.2 Apport dans les eaux	16	6.4 Perspectives	64
2.3 Effets nocifs des micropolluants	20	<hr/>	
2.4 Mesures visant à réduire les apports de micropolluants	24	Annexes	66
2.5 Constat	25	A1 Substances présentes en Suisse et objectifs de qualité proposés	66
<hr/>		A2 Substances étudiées et plages de concentration	69
3 L'épuration actuelle des eaux en Suisse	27	A3 Taux d'élimination obtenus par ozonation et par le procédé au CAP	71
3.1 Mission de l'évacuation des eaux urbaines et de l'épuration des eaux	27	<hr/>	
3.2 L'épuration des eaux aujourd'hui	28	Remerciements	73
3.3 Equipement des stations d'épuration communales	30	Bibliographie	74
3.4 Coûts et prestations de l'épuration des eaux	31	Répertoires	83
3.5 Elimination des micropolluants dans les STEP actuelles	33	Glossaire	86
3.6 Constat	35	<hr/>	
<hr/>			
4 Procédés d'élimination des micropolluants	36		
4.1 Aperçu des procédés existants	36		
4.2 Exigences à remplir par un procédé supplémentaire	38		
4.3 Ozone	39		
4.4 Charbon actif: CAP et CAG	40		
4.5 Membranes denses	42		
4.6 Oxydation avancée	43		
4.7 Autres procédés	45		
4.8 Constat	47		

> Abstracts

Various studies over recent years have shown that treated municipal wastewater contributes significantly to water pollution from micropollutants. This contamination can be minimized by upgrading current wastewater treatment plants to include an additional treatment step. In the “Micropoll Strategy” project complementary treatment steps have been evaluated. This report shows that water quality can be significantly improved using processes such as powdered activated carbon adsorption or ozonation.

Keywords:

Micropollutants,
Municipal wastewater,
Advanced processes

Verschiedene Arbeiten der letzten Jahre haben gezeigt, dass gereinigtes kommunales Abwasser wesentlich zur Belastung der Gewässer mit Mikroverunreinigungen beiträgt. Dieser Eintrag kann mit einer Erweiterung heutiger Abwasserreinigungsanlagen um eine zusätzliche Stufe minimiert werden. Im Projekt «Strategie Micropoll» wurden grosstechnische Pilotversuche mit zwei Verfahren durchgeführt. Dieser Bericht zeigt, dass mit weitergehenden Verfahren, wie z. B. mit Adsorption an Pulveraktivkohle oder Ozonung, die Wasserqualität deutlich verbessert werden kann.

Stichwörter:

Mikroverunreinigungen,
Kommunales Abwasser,
Weitergehende Verfahren

Des travaux menés ces dernières années ont montré que les eaux usées communales, même traitées, sont l'une des principales sources de la charge en micropolluants dans les eaux. Nous savons désormais qu'il est possible de réduire l'apport de ces polluants en équipant les stations d'épuration existantes d'une étape de traitement supplémentaire. Le projet Stratégie MicroPoll a évalué de telles solutions. Le présent rapport explique des procédés comme l'ozonation ou l'adsorption sur du charbon actif en poudre permettent d'améliorer sensiblement la qualité de l'eau.

Mots-clés:

Micropolluants,
eaux usées communales,
procédés d'épuration
supplémentaires

Diversi studi effettuati negli ultimi anni hanno dimostrato che le acque di scarico comunali trattate sono una delle principali fonti di microinquinanti nelle acque. Questo apporto di inquinanti può essere ridotto al minimo equipaggiando gli impianti di depurazione delle acque con una fase supplementare di trattamento. Nell'ambito del progetto «Strategia MicroPoll» sono stati esaminati vari procedimenti. Dal presente rapporto si evince che determinati procedimenti, come ad esempio l'assorbimento su carbone attivo in polvere o l'ozonizzazione, consentono di migliorare sensibilmente la qualità delle acque.

Parole chiave:

microinquinanti,
acque di scarico comunali,
procedimenti supplementari

> Avant-propos

Une bonne qualité des eaux de surface est indispensable à la protection des écosystèmes aquatiques et des ressources en eau potable. Au cours des dernières décennies, la construction des stations d'épuration a considérablement amélioré la qualité des eaux. Celles-ci sont cependant soumises à une pression croissante, due notamment à la densification urbaine, au réchauffement climatique et à la pollution engendrée par les zones urbaines, les voies de communication et l'agriculture.

Ces dernières années, divers projets (PNR50 «Perturbateurs endocriniens: Importance pour les êtres humains, les animaux et les écosystèmes», Réseau suisse poissons en diminution «Fischnetz») se sont penchés sur le problème des micropolluants et ont démontré qu'il importe d'améliorer le traitement des eaux usées. Partant de ce constat, l'OFEV a lancé en 2006 le projet «Stratégie MicroPoll», afin d'élaborer une stratégie relative aux micropolluants dans les eaux usées urbaines. Ce projet prend fin avec la publication du présent rapport, qui évalue les procédés techniques permettant d'optimiser les installations de traitement des eaux usées en vue de pouvoir garantir une protection suffisante des écosystèmes et des ressources en eau potable contre les micropolluants.

Le rapport s'adresse aux autorités, aux propriétaires et aux exploitants de stations d'épuration, aux bureaux d'ingénieurs, aux membres d'organes politiques chargés de la protection des eaux ainsi qu'à toutes les personnes intéressées par le thème des micropolluants. Il se subdivise en deux parties: la première est d'ordre général et contient des informations sur le problème des micropolluants dans les eaux usées urbaines; la seconde, destinée aux spécialistes, décrit en détail les différents procédés d'élimination des micropolluants.

Willy Geiger
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Résumé

Déversés en continu via les effluents des stations d'épuration communales notamment, les micropolluants exercent quantité d'effets indésirables sur nos eaux. Le présent rapport montre pourtant qu'il suffirait d'équiper nos STEP d'une étape supplémentaire de traitement pour réduire sensiblement les teneurs en micropolluants des eaux usées au sortir des STEP et, partant, pour réduire au minimum les effets néfastes sur les écosystèmes ainsi que la pollution de nos ressources en eau potable par les composés organiques provenant des eaux usées urbaines.

Les micropolluants sont des substances organiques présentes dans les eaux à des concentrations de l'ordre du nanogramme ou du microgramme par litre, et qui, même à des concentrations aussi infimes, peuvent influencer des processus biochimiques fondamentaux. On trouve tout d'abord parmi les micropolluants une diversité de substances synthétiques comme les substances actives médicamenteuses, les produits biocides (protection des matériaux, phytosanitaires, etc.), les additifs alimentaires, les composants de produits cosmétiques ou les détergents, mais également des substances d'origine naturelle comme typiquement les hormones.

Les STEP communales actuelles sont construites de façon à éliminer les substances solides, les substances organiques dégradables ainsi que les nutriments et, par là même, contribuent de façon déterminante à la protection des eaux comme au bon état général de la qualité des eaux de surface en Suisse. Si les STEP récentes, équipées selon les dernières avancées technologiques, sont en mesure d'éliminer aussi certains micropolluants, nombre de ces substances potentiellement dangereuses ne sont pas dégradables biologiquement et difficilement adsorbables. Elles ne sont donc pas éliminées, ou dans des proportions très faibles uniquement, et les apports constants des ménages comme de l'industrie traversent les stations d'épuration pour aboutir dans nos eaux avec les eaux usées traitées.

Etant donné le déversement continu d'eaux usées épurées, les organismes vivants présents dans les eaux sont exposés en permanence à cette nuisance. Or à des concentrations très faibles déjà, les micropolluants peuvent exercer des effets néfastes sur certains organismes aquatiques sensibles: ils influent sur la croissance et la reproduction des poissons ou des amphibiens, endommagent le système nerveux des animaux aquatiques, ou entravent la photosynthèse des algues. Les effets indésirables qu'une substance déploie dans les eaux dépendent d'une part de ses propriétés physico-chimiques et éco-toxicologiques, et d'autre part de sa concentration. C'est avant tout dans les eaux charriant une grande proportion d'eaux usées traitées que l'on trouve une concentration élevée d'un large éventail de substances, soit notamment dans les cours d'eau de petite à moyenne taille du Plateau suisse.

Pour réduire d'une manière appréciable les teneurs en micropolluants des eaux usées urbaines, des mesures à différents niveaux s'imposent. Des mesures prises à la source, tout d'abord, permettent d'empêcher que ces substances ne parviennent dans les eaux

Qu'est-ce qu'un micropolluant?

Les micropolluants ne sont pas suffisamment éliminés dans les STEP actuelles.

Une charge permanente pour nos eaux et nos cours d'eau

Des mesures s'imposent

usées. Pour diverses substances problématiques, des mesures s'imposent ainsi au stade de l'autorisation, de la production, de l'application ainsi que de l'élimination. Or s'il peut ponctuellement s'avérer utile et économique de restreindre l'emploi de certaines de ces substances, c'est impossible pour d'autres, comme les médicaments. Pour réduire nettement les apports d'un large spectre de micropolluants en provenance des eaux usées urbaines, il faut donc recourir à des méthodes assurant une épuration plus poussée. Diverses études menées en Suisse comme à l'étranger ont permis d'identifier deux procédés se prêtant à une mise en œuvre à grande échelle: le traitement au charbon actif en poudre (CAP) et l'ozonation. Les deux procédés ont tout d'abord fait l'objet d'essais pilotes: le charbon actif dans les STEP de Lausanne et de Kloten/Opfikon, ainsi qu'à l'Eawag, et l'ozonation dans les STEP de Regensdorf et de Lausanne (essais à grande échelle). Ces essais pilotes avaient notamment pour objet d'élaborer des bases de dimensionnement, d'accumuler de l'expérience sur le terrain et d'évaluer les effets sur la qualité de l'eau au sortir de la STEP.

Le CAP n'est autre que du charbon actif moulu très finement, que l'on mélange aux eaux usées à épurer afin que les substances indésirables se fixent à la surface des particules de charbon. Etant donné que le charbon actif adsorbe non seulement les micropolluants mais aussi les substances organiques naturelles, il vaut mieux faire précéder l'épuration au charbon actif par une épuration biologique poussée, pour réduire autant que faire se peut la consommation de charbon actif. Le CAP chargé de micropolluants est ensuite séparé des eaux usées et éliminé. Les divers procédés testés pour la séparation ont tous permis d'assurer une rétention acceptable des matières solides: sédimentation et filtre textile, filtre à sable, ultrafiltration (membrane). Etant donné la teneur élevée en micropolluants des eaux brutes, le charbon actif chargé peut être réintroduit dans l'étape biologique et ainsi permettre un meilleur taux d'utilisation du CAP et donc de réduire encore sa consommation. Au final, le CAP est éliminé avec les boues d'épuration (incinération). L'utilisation de CAP n'alourdit pas beaucoup la facture énergétique d'une STEP (<5 % sans filtre). 12 à 15 g CAP/m³ d'eau suffisent à éliminer la majeure partie (>80 %) des micropolluants et, outre une réduction sensible de leur écotoxicité (action endocrinienne, toxicité pour les algues, etc.), ils permettent de décolorer en bonne partie les eaux usées. Il est en général possible d'ajouter une étape d'épuration au CAP à une STEP existante, mais en fonction du procédé de séparation utilisé, cela suppose que l'on dispose d'un espace important.

L'ozonation consiste à injecter de l'ozone sous forme gazeuse dans les eaux usées épurées. L'ozone dissous dans l'eau réagit avec les micropolluants et les transforme (oxydation). Comme l'efficacité de l'ozonation dépend elle aussi de la teneur en substances organiques, elle est, elle aussi, mise en œuvre après un traitement biologique poussé. Une ozonation s'intègre en général bien dans les stations d'épuration existantes, moyennant une augmentation de 10 à 30 % de leur facture énergétique brute. Une dose de 3 à 5 g O₃/m³ d'eau est nécessaire pour éliminer la majeure partie (>80 %) des micropolluants et pour réduire sensiblement leur écotoxicité (action endocrinienne, toxicité pour les algues, etc.). Elle permet en outre d'éliminer une grande partie des germes pathogènes et de décolorer l'eau. Pour compenser la formation occasionnelle de produits réactifs de l'oxydation, il est recommandé de faire suivre l'ozonation d'une étape de traitement biologique (filtre à sable p. ex.), qui suffit en principe à assurer des teneurs nulles au sortir de la STEP.

Adsorption sur du charbon actif:
élimination efficace des
micropolluants et décoloration
des eaux usées

Ozonation: élimination d'une
grande partie des micropolluants
et désinfection des eaux usées

Outre l'adsorption sur du CAP et l'ozonation, d'autres procédés conviendraient également à l'élimination des micropolluants. Citons à cet égard l'adsorption sur du charbon actif en grains, la rétention au moyen de membranes denses (nano-filtration, osmose inverse), l'oxydation des composés organiques par des radicaux hydroxyles (advanced oxidation processes – AOP), l'adjonction de ferrate et d'autres oxydants. Pour diverses raisons, toutefois, ces procédés ne se prêtent pas à une utilisation à grande échelle dans les STEP communales: on manque par exemple d'expérience dans leur emploi à grande échelle, les difficultés techniques sont trop importantes ou leur rentabilité insuffisante, etc.

Autres procédés

Tant le traitement au charbon actif en poudre que l'ozonation permettent d'améliorer sensiblement la qualité de l'eau épurée pour ce qui touche à leur teneur en micropolluants et leurs effets néfastes. Dans les régions étudiées, on a ainsi constaté que ces nouveaux procédés d'épuration permettaient d'abaisser suffisamment la concentration de la plupart des micropolluants examinés pour que même dans les cours d'eau charriant de grandes quantités d'eaux usées, les effets négatifs sur les organismes vivants (perturbations de la reproduction ou de la croissance, p. ex.) soient quasi nuls.

Effet positif sur la qualité de l'eau

Les études et essais pilotes menés jusqu'ici ont confirmé que l'introduction d'une étape supplémentaire de traitement dans les STEP communales constituait une mesure efficace pour améliorer la qualité des eaux. Comme l'importance de la problématique des micropolluants varie fortement selon le cours d'eau considéré, on veillera à procéder de façon ciblée. On donnera ainsi la priorité aux STEP de grande taille (réduction de la charge polluante) et à certaines STEP situées sur des cours d'eau charriant une part importante d'eaux traitées (protection des écosystèmes) ou sur des cours d'eau ou plans d'eau servant à la production d'eau potable (protection des ressources en eau potable). En équipant environ 100 STEP, sur plus de 700, on assurera le traitement de la moitié des eaux usées en Suisse, et l'on atteindra les objectifs fixés. La sélection des STEP est du ressort des cantons, mais doit s'opérer en coopération étroite avec tous les acteurs concernés et en tenant compte des bassins versants.

Train de mesures de l'OFEV: équipement ciblé de certaines STEP

L'ajout d'une étape de traitement supplémentaire se répercute sur la consommation énergétique des STEP. En règle générale, leur facture énergétique s'alourdit de quelque 5 à 30 % (sans filtre), mais ce peut être plus dans des cas peu favorables, en fonction de la taille de l'installation, de la qualité des eaux usées et du procédé appliqué. A l'échelle d'une seule STEP, l'ozonation conduit à une augmentation sensible de la consommation énergétique; et en tenant compte de l'énergie grise nécessaire à la production des agents d'épuration, les traitements au charbon actif consomment encore un peu plus, car 3 à 5 kg de charbon sont nécessaires pour produire 1 kg de charbon actif. Si l'on considère en revanche le bilan énergétique de la Suisse, l'utilisation de charbon actif ou d'ozone n'a qu'un impact modeste (<0,15 % de la consommation électrique de la Suisse), ce qui, au vu de l'amélioration de la qualité de l'eau obtenue, apparaît comme tout à fait défendable.

Un accroissement acceptable de la facture énergétique

Le coût moyen de l'épuration des eaux en Suisse se monte actuellement à 0,70 fr./m³, soit à quelque 130 fr./hab./an (frais liés aux STEP uniquement). Avec l'ajout d'une étape de traitement (sans filtration), les coûts d'épuration augmentent de 0,05 à 0,30 fr./m³, plus si les conditions sont défavorables (composition des eaux usées,

Une hausse modeste des coûts est à prévoir: 17 francs par habitant et par an

infrastructures, etc.). Le coût est d'ailleurs essentiellement le même, que l'on recoure au charbon actif ou à l'ozonation, et dépend avant tout de la taille de l'installation, des infrastructures existantes et de la composition des eaux usées. Le train de mesures envisagé induit un surcoût de l'épuration des eaux d'environ 130 millions de francs, soit 17 francs par habitant.

Le présent rapport décrit l'état des connaissances concernant les étapes de traitement supplémentaires destinées à éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Les aspects détaillés touchant à la mise en œuvre du train de mesures ne sont pas abordés dans le présent rapport mais le sont dans le cadre de diverses activités en cours. Une solution de financement à l'échelle de la Suisse est à l'étude, ainsi que les bases légales nécessaires à la planification et au financement des mesures à prendre au niveau des STEP communales pour réduire les charges en micropolluants. Ces travaux associent étroitement l'OFEV, les cantons, les communes ainsi que les propriétaires et les exploitants de STEP. Une plateforme nationale et internationale d'échange sera par ailleurs mise en place, qui permettra aux ingénieurs et aux exploitants de STEP ainsi qu'aux autorités de développer leurs compétences techniques dans le domaine des traitements supplémentaires destinés à éliminer les micropolluants.

Perspectives

1 > Introduction

1.1 Micropolluants

La protection des eaux est aujourd'hui confrontée à un défi de taille: l'apport de composés traces organiques dans les eaux. En Suisse, plus de 30 000 substances organiques de synthèse entrent dans la composition d'innombrables produits d'usage quotidien. Parmi elles figurent médicaments, agents pour la protection des végétaux et des matériaux, détergents, produits de soins corporels et bien d'autres encore. Transportées par les eaux usées urbaines ou provenant de sources diffuses, nombre de ces substances parviennent dans les eaux, où on les trouve en concentrations très faibles (ng/l-µg/l). On les appelle dès lors aussi composés traces organiques ou micropolluants. Dans le présent rapport, nous utilisons de préférence le terme «micropolluants».

D'innombrables substances parviennent dans les eaux

Les substances organiques de synthèse sont souvent utilisées pour leur effet biologique. Leur présence dans les eaux peut cependant avoir des conséquences néfastes pour les organismes aquatiques. Voilà pourquoi les micropolluants font l'objet de divers projets de recherche, tant en Suisse qu'à l'étranger. Ces travaux ont par exemple démontré que, même en concentrations infimes, des perturbateurs endocriniens (hormones naturelles ou de synthèse, substances synthétiques à effets pseudo-hormonaux) influent sur la reproduction d'organismes aquatiques (Suter et Holm 2004; PNR50 2008). Mentionnons par ailleurs les biocides et les produits phytosanitaires, auxquels on recourt pour lutter contre des organismes vivants «indésirables». Une fois dans l'eau, ces substances déploient cependant le même effet sur tout ce qui y vit. La même remarque vaut pour diverses substances actives médicamenteuses.

Les micropolluants peuvent nuire aux organismes aquatiques

Contrairement aux pesticides organiques (biocides et produits phytosanitaires) et aux métaux lourds, l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) ne soumet pas les composés traces organiques à une exigence chiffrée afin d'évaluer et de garantir la qualité de l'eau. Les aides à l'exécution régissant certains domaines, comme l'utilisation de produits phytosanitaires et de nutriments dans l'agriculture ou l'évacuation des eaux des voies de communication, formulent toutefois des bases d'évaluation et de mesures destinées à réduire les émissions de ces substances.

Absence de bases légales

Conçues pour dégrader les nutriments présents dans les eaux usées (carbone organique, phosphore et azote), les stations d'épuration des eaux (STEP) communales n'éliminent que partiellement, voire pas du tout, nombre de micropolluants. Elles constituent dès lors la principale voie d'apport, par laquelle ces derniers parviennent constamment dans les eaux. Des relevés ont très tôt révélé que la somme des substances isolées peut atteindre quelques centaines de µg/l dans les eaux traitées (Schlupe et al. 2006) et ces observations ont été confirmées par des études plus récentes. Les déversoirs d'orage, qui relâchent des eaux mélangées dans le milieu récepteur en cas de précipitations, et le manque d'étanchéité des canalisations constituent d'autres voies d'apport.

Principale voie d'apport: les eaux usées traitées

La Suisse ne disposant pas des bases requises pour soumettre le problème des composés traces organiques provenant des eaux usées urbaines à une évaluation systématique et identifier les mesures à prendre, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a lancé, en 2006, le projet «Stratégie Micropoll – Micropolluant dans les eaux» afin d'élaborer les bases nécessaires et de formuler une stratégie en matière de micropolluants dans les eaux usées urbaines.

Elaboration de bases pour évaluer le problème des micropolluants dans les eaux usées urbaines

1.2 **Projet «Stratégie Micropoll»**

1.2.1 **Objectifs du projet et activités menées**

Le projet «Stratégie Micropoll» avait pour objectif d'élaborer des bases de décision en vue de définir une stratégie visant à réduire l'apport de micropolluants provenant des eaux usées urbaines. A cet effet, il fallait, d'une part, apprécier la pollution des eaux en Suisse (situation actuelle) et fixer des exigences chiffrées en termes de qualité de l'eau, afin d'évaluer le besoin d'intervenir. D'autre part, on voulait tester à grande échelle des procédés techniques assurant une épuration supplémentaire des eaux usées, afin d'apprécier leur adéquation et leur efficacité. Ce faisant, on a pris en considération les préparatifs et les fondements de diverses autres études (Gälli et al. 2009).

Objectif du projet «Stratégie Micropoll»: élaborer des bases de décision en vue de réduire les apports de micropolluants

Voici les principales étapes du projet:

- > *Analyse de la situation, preuve du besoin d'intervenir:* Une analyse de la charge de micropolluants provenant des eaux usées urbaines a révélé que les effluents de STEP représentent une importante voie d'apport de nombre de ces substances et que la pollution est particulièrement marquée dans les cours d'eau charriant une grande proportion d'eaux traitées (Gälli et al. 2009, cf. aussi chap. 2). Sont principalement concernés les cours d'eau qui drainent les régions à forte densité de population. Diverses mesures sont à même d'éviter l'apport de micropolluants. Les travaux menés ont en particulier montré qu'une amélioration ciblée de l'épuration des eaux usées permet de le réduire sensiblement. En équipant environ 100 des plus de 700 STEP que compte la Suisse d'une étape de traitement supplémentaire, il serait possible d'éviter les atteintes que ces substances portent aux végétaux et aux animaux sensibles dans les tronçons critiques de cours d'eau et d'assurer une protection suffisante des ressources en eau potable (Schärer et al. 2010).
- > *Système d'évaluation:* Nombre des substances provenant des eaux usées urbaines engendrent une pollution pour ainsi dire constante, c'est-à-dire que leurs flux et leurs concentrations dans les eaux usées et dans les eaux ne subissent pas de grandes variations. Il est dès lors relativement facile de les identifier. Un rapport commandé par l'OFEV décrit une démarche envisageable pour récolter et évaluer des données sur les micropolluants provenant des eaux usées urbaines (Götz et al. 2010b). Pour certaines substances (composés traces «spécifiques à la Suisse»), ce rapport propose des critères de qualité sur une base écotoxicologique (Ökozentrum 2011). Leur dépassement signifie que la santé des organismes aquatiques est en danger. Or des relevés et des bilans de substances établis pour divers cours d'eau suisses prouvent

L'analyse de la situation a montré qu'une optimisation du traitement des eaux usées s'impose

Système de relevés et d'évaluation: critères de qualité dépassés dans les cours d'eau à forte charge d'eaux usées urbaines

que plusieurs substances dépassent (simultanément dans les sites très affectés) les critères de qualité proposés.

- > *Bases techniques de mise en œuvre*: Cette partie des travaux avait pour but d'évaluer divers systèmes d'épuration supplémentaires devant éliminer les micropolluants dans les STEP. On a ainsi étudié le rendement d'épuration de certains procédés, de même que leurs conséquences techniques, énergétiques et financières pour les STEP. La réalisation d'essais pilotes à grande échelle a occupé une grande place dans ces travaux (Abegglen et al. 2009, Margot et al. 2011, Bähler et al. 2011).
- > *Autres activités*: Parallèlement aux trois étapes décrites ci-dessus, diverses études scientifiques ont été menées en marge du projet, par exemple sur le rôle des eaux usées des hôpitaux ou celui des substances issues de la transformation des micropolluants (p. ex. Brügger et al. 2010, Fenner et al. 2011). Ces études ne sont pas décrites plus avant dans le présent rapport.

Essais pilotes destinés à tester des étapes de traitement supplémentaires dans des STEP communales

Diverses études scientifiques réalisées en marge du projet

1.2.2 Structure du projet

La coordination et la direction du projet «Stratégie Micropoll» ont été assurées par l'OFEV. Des représentants des autorités cantonales (CCE) et communales (IC), de l'économie (Scienceindustries), des milieux scientifiques et d'associations professionnelles (VSA) ont siégé au sein des organes du projet (direction et groupe d'accompagnement), de même que dans les divers groupes de travail. Cette large participation, de même que l'implication de plusieurs partis et groupes d'intérêts, ont garanti l'orientation pratique du projet.

Orientation pratique

1.2.3 Cadre du projet

La «Stratégie Micropoll» se concentre sur l'apport dans les eaux de micropolluants provenant des eaux usées urbaines. Ces micropolluants sont principalement des résidus de substances présentes dans les eaux des ménages, tels les principes actifs de médicaments ou les produits chimiques d'usage courant, mais aussi des résidus de substances que l'on rencontre par ailleurs en milieu urbanisé, comme les biocides entrant dans la composition de revêtements de façades.

Accent sur les eaux usées urbaines

Les eaux usées urbaines, aussi appelées communales, comprennent (OEaux, annexe 3.1):

- > les eaux des ménages (eaux provenant effectivement des ménages et eaux de qualité comparable);
- > les eaux de ruissellement s'écoulant des surfaces bâties ou imperméabilisées et évacuées avec les eaux des ménages.

Cela étant, la «Stratégie Micropoll» vise plus particulièrement les substances qui parviennent dans l'environnement avec les eaux usées traitées après avoir transité par

la STEP. Il s'agit donc de substances que les procédés d'épuration actuels n'éliminent qu'insuffisamment, voire pas du tout.

Outre les eaux usées urbaines, l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) définit les eaux industrielles et d'autres eaux polluées. Les eaux industrielles comprennent les eaux à évacuer provenant des entreprises artisanales et industrielles, ainsi que celles provenant des laboratoires et des hôpitaux. Si ces eaux à évacuer n'ont pas été spécialement abordées dans le projet «Stratégie Micropoll», les méthodes et systèmes proposés ici permettent également de les évaluer, du moins en partie. Soulignons cependant, que ces eaux peuvent être polluées par des substances spécifiques et qu'une analyse au cas par cas s'impose.

Le projet ne s'est pas spécialement penché sur les eaux industrielles

Parmi les autres eaux polluées, l'OEaux classe notamment les eaux météoriques polluées qui s'écoulent des surfaces bâties ou imperméabilisées et qui ne sont pas mélangées aux eaux usées urbaines. Lorsqu'elles sont évacuées dans des conduites séparées, ces eaux météoriques ne sont pas assimilées aux eaux usées urbaines.

Le présent rapport ne traite pas des autres eaux polluées

1.3 Objectifs du rapport

Le présent rapport a pour objectif d'évaluer la capacité de divers procédés techniques, applicables dans les STEP, à éliminer les composés traces organiques, de même que de déterminer leur influence sur la qualité de l'eau, les infrastructures existantes, la consommation énergétique et les coûts. Se consacrant exclusivement aux eaux usées urbaines et aux mesures à mettre en œuvre dans les STEP communales, il n'évoque que marginalement le problème des apports diffus (substances provenant de surfaces agricoles ou des voies de circulation). Ces problématiques font en effet actuellement l'objet de travaux dont les résultats seront publiés ultérieurement.

Explications et remarques concernant divers procédés techniques

2 > Micropolluants provenant des eaux usées urbaines

Nombre de micropolluants parviennent dans les eaux par le biais des effluents de stations d'épuration. Ils constituent alors une charge permanente dans l'environnement et risquent (lorsque l'effluent n'est pas suffisamment dilué) de porter atteinte aux organismes aquatiques et dès lors à tout l'écosystème. Pour réduire l'apport de micropolluants, des mesures s'imposent à différents niveaux, mais seule une optimisation ciblée des stations d'épuration permettra de réduire sensiblement l'apport d'une vaste palette de substances.

2.1 Substances actives

En Suisse, on emploie environ 30 000 substances organiques de synthèse (Gälli et al. 2009), qui engendrent par ailleurs d'innombrables métabolites (produits de leur dégradation). Ces substances de synthèse entrent dans la composition d'une multitude de produits d'usage courant (médicaments, denrées alimentaires, détergents, matériaux de construction, revêtements, produits de soins corporels, etc.). Destinés à toutes sortes d'usages dans les domaines de la santé, de l'hygiène, de la protection de matériaux et même du bien-être, ces produits sont utilisés pour leurs propriétés particulières. Les propriétés thérapeutiques des principes actifs des médicaments, l'effet désinfectant des biocides ou le goût sucré des édulcorants artificiels des boissons «légères» occupent ainsi une grande place dans notre société. Les propriétés de ces substances sont recherchées là où elles sont utilisées. Par le biais des eaux usées urbaines, épurées ou non épurées, des résidus de ces composés parviennent cependant souvent dans les eaux, où ils peuvent se révéler néfastes pour les organismes aquatiques. Ce sont surtout les substances toxiques et difficilement dégradables qui posent problème. Le chapitre 3.2 décrit divers micropolluants et leur impact sur l'écosystème aquatique.

Quelque 30 000 substances organiques de synthèse sont utilisées couramment

2.2 Apport dans les eaux

2.2.1 Voies d'apport

Que l'on considère les zones urbanisées ou agricoles, les micropolluants proviennent de sources variées et parviennent dans les eaux par différentes voies d'apport (fig. 1).

Fig. 1 > Sources et voies d'apport de micropolluants

Les micropolluants parviennent dans les eaux en empruntant différentes voies d'apport (en rouge). Le présent rapport se concentre sur les apports provenant des STEP.



Les sources ou les voies d'apport de certaines substances sont manifestes. Médicaments à usage humain, additifs alimentaires, substances entrant dans la composition de produits cosmétiques ou détergents proviennent le plus souvent des effluents de STEP et, dans une moindre mesure, du déversement de trop-pleins d'eaux mélangées. Pouvant être localisés avec précision, ces apports sont appelés sources ponctuelles ou apports ponctuels. A l'inverse, les apports provenant de l'agriculture ou des voies de circulation se produisent sur de grandes surfaces et il est difficile de les localiser. On parle alors de sources diffuses ou d'apports diffus. Il s'agit par exemple de l'apport de produits phytosanitaires emportés par ruissellement lorsqu'une pluie survient après leur épandage. Certains agents herbicides (mécoprop et diuron, p. ex.) sont utilisés aussi bien dans l'agriculture que dans les zones urbanisées (protection de façades ou de toits plats), de sorte qu'ils proviennent aussi bien de sources ponctuelles que diffuses.

Comment les micropolluants parviennent-ils dans les eaux?

Le présent rapport s'intéresse en priorité aux micropolluants qui parviennent dans les eaux par le biais des réseaux d'assainissement, en particulier avec les eaux usées urbaines traitées ou non traitées. Voici les principales voies d'apport à prendre en considération (Götz et al. 2010b):

- > *Effluents de STEP*: Près de 97 % de la population suisse est aujourd'hui raccordée à une station communale d'épuration des eaux (OFEV 2011). Outre les eaux usées des ménages, les STEP traitent aussi les eaux (partiellement prétraitées) de l'industrie et de l'artisanat et, souvent, une partie des eaux pluviales (réseaux unitaires) s'écoulant des surfaces imperméabilisées. Les composés difficilement dégradables et non adsorbables restent dans les eaux usées traitées et parviennent dans les eaux, où ils constituent la majeure partie de la charge en micropolluants. Dans les cas des substances que les STEP éliminent très bien, ce sont les autres voies d'apport, tels les déversements d'eaux mélangées, qui jouent un rôle essentiel.
- > *Déversoirs d'orage*: En Suisse, environ 70 % des zones urbanisées sont équipées d'un réseau unitaire d'assainissement (Maurer et Herlyn 2006). Il arrive que de fortes précipitations surchargent ces réseaux, dont les déversoirs d'orage relâchent alors une partie des eaux à évacuer (mélange d'eaux pluviales et d'eaux usées non traitées). On estime que sur le Plateau suisse 1 à 4 % des eaux usées non traitées parviennent ainsi directement dans les eaux (Bürge et al. 2003).
- > *Déversement d'eaux pluviales*: Environ 30 % des zones urbanisées sont équipées d'un réseau séparatif: outre un réseau d'égouts qui évacue les eaux des ménages, elles possèdent un second réseau qui collecte les eaux pluviales s'écoulant sur les surfaces imperméabilisées pour les déverser directement dans les eaux. Pour la plupart des micropolluants des eaux usées urbaines, cette voie d'apport joue un rôle négligeable du point de vue quantitatif. Pour les substances appliquées en dehors des zones urbanisées, tels certains biocides ou agents pour la protection de matériaux, les apports dus au déversement d'eaux pluviales peuvent néanmoins s'avérer importants.
- > *Fuites dans les canalisations*: Il est difficile d'évaluer la quantité d'eaux usées qui fuient des canalisations, car elle dépend beaucoup de l'état du réseau. Selon l'emplacement des conduites et du niveau des eaux souterraines, de l'eau claire peut pénétrer dans les canalisations ou des eaux usées peuvent s'en écouler. La proportion d'eaux non traitées qui parviennent dans les eaux souterraines par des fuites dans les canalisations varie entre 0 % environ et plus de 10 % par endroits (Rieckermann 2006). Aucune donnée n'est disponible sur les déversements dus aux erreurs de raccordement ou aux raccordements d'immeubles non étanches.

Apports provenant des eaux usées urbaines

Effluents de STEP

Déversoirs d'orage

Déversements d'eaux pluviales

Fuites dans les canalisations

Dans l'ensemble, environ 90 à 95 % des eaux usées urbaines sont traitées dans une STEP centrale, les 5 à 10 % restants parvenant dans les eaux ou dans le sous-sol sans avoir été épurées ou alors après un traitement minimal (habitants non raccordés, déversoirs d'orage, pertes dans le réseau d'assainissement). Par ailleurs, les eaux pluviales des zones urbanisées sont déversées pour un peu plus de la moitié directement dans les eaux, pour un quart, elles s'infiltrent dans le sol et, pour un quart, elles sont traitées à la STEP (Schluep et al. 2006).

Jusqu'à 95 % des eaux usées urbaines sont traitées

2.2.2 Dynamique d'apport

Sur l'ensemble de la population, la consommation de médicaments et de produits chimiques utilisés dans les ménages s'avère plus ou moins régulière et constante. Des résidus de ces substances parviennent donc presque en permanence dans les eaux usées et, par le biais des STEP, dans les eaux. La consommation de certaines de ces substances accuse toutefois de fortes variations saisonnières: les filtres UV des crèmes solaires sont employés davantage en été, tandis que les médicaments contre la grippe et les refroidissements plutôt en hiver.

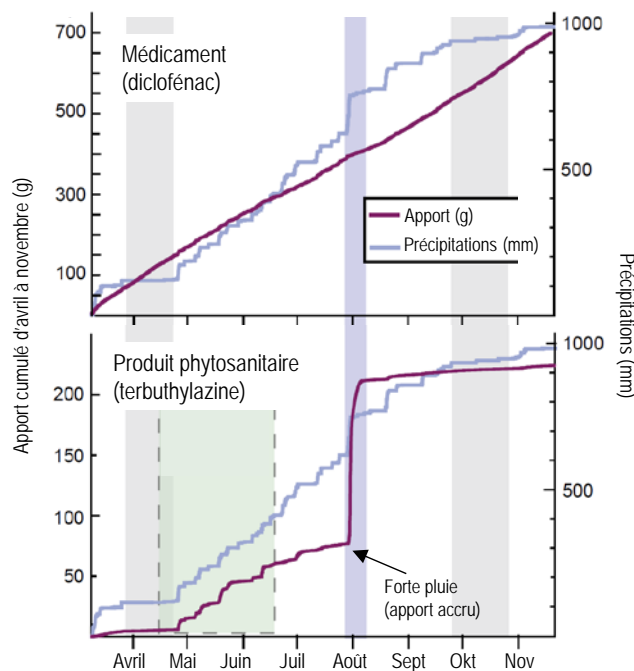
Les substances qui parviennent dans les eaux par des voies diffuses présentent en général une dynamique d'apport nettement plus complexe. Le projet REXPO (Wittmer et al. 2010) s'est penché sur la dynamique d'apport de produits phytosanitaires et de médicaments dans divers types de bassins versants. La fig. 2 illustre les apports, au fil de l'année, d'une substance présente dans les eaux usées urbaines et d'une substance en usage dans l'agriculture. Le diclofénac, analgésique largement répandu, est consommé tout au long de l'année et surtout dans les ménages privés, de sorte que ses apports sont constants. Les apports de terbuthylazine, un produit phytosanitaire employé dans l'agriculture, varient au contraire beaucoup: appliquée uniquement à certaines périodes de l'année, la substance est emportée en cas de pluie et parvient directement dans les eaux, soit par ruissellement soit via les drainages.

Apport continu par le biais des eaux usées urbaines

Dynamique d'apport complexe pour les substances utilisées dans l'agriculture

Fig. 2 > Dynamique d'apport de micropolluants

Apport cumulé de diclofénac et de terbuthylazine dans un petit cours d'eau. Alors que les apports du médicament provenant des eaux usées urbaines sont réguliers, le produit phytosanitaire parvient dans les eaux surtout durant de fortes précipitations (il est emporté par ruissellement sur les surfaces cultivées).



2.3

Effets nocifs des micropolluants

Comme nombre de substances parviennent en continu dans les eaux par le biais des STEP, leurs concentrations varient relativement peu. Cela signifie que les végétaux, les animaux et les micro-organismes aquatiques sont soumis en permanence à une charge polluante, que l'on qualifie alors de chronique. Selon la substance présente, une telle pollution peut, même à des concentrations très faibles (de l'ordre du nanogramme [ng] ou du microgramme [µg] par litre), avoir des conséquences néfastes sur les organismes aquatiques. Voici les effets qui ont été observés pour les substances ayant un impact sur l'environnement:

Pollution chronique

- > Les substances à effet herbicides entravent la photosynthèse des algues.
- > Les insecticides endommagent le système nerveux des animaux aquatiques.
- > Les perturbateurs endocriniens (œstrogènes, p.ex.) affectent la reproduction de poissons et d'autres organismes vivants (tels les mollusques (PNR50 2008, Kidd et al. 2007, Stalter et al. 2010a, Sumpter 2005)).

Certaines substances peuvent en outre provoquer des effets secondaires indésirables chez les organismes aquatiques:

Effets secondaires spécifiques

- > Lorsque ses concentrations dépassent certains seuils, l'analgésique diclofénac, largement répandu, peut endommager les reins des poissons (p. ex. Hoeger et al. 2005).
- > Les agents ignifuges, utilisés par exemple dans les meubles rembourrés, les appareils électriques et électroniques ou les bâtiments afin d'éviter les incendies, peuvent perturber la reproduction d'organismes aquatiques (Legler et Brouwer 2003, Hamers et al. 2006).
- > Les insecticides peuvent notamment causer des dégâts subtils, encore mal connus, tels des troubles du comportement (dus notamment à des perturbations de l'orientation olfactive) ou une détérioration du système immunitaire des organismes (p. ex. Clifford et al. 2005, Scholz et al. 2006).
- > La situation s'avère d'autant plus grave que les effets de substances aux propriétés similaires peuvent se cumuler. D'autres facteurs de stress, comme le rayonnement UV, une hausse de la température ou une détérioration de la quantité et de la qualité de la nourriture disponible, peuvent également influencer sur les atteintes. Il arrive de plus que les effets indésirables ne se manifestent qu'après plusieurs générations (p. ex. Kidd et al. 2007, Heckmann et al. 2007).

Dans le cadre du projet «Stratégie Micropoll», on a élaboré un programme de relevés et un système d'évaluation pour apprécier la qualité de l'eau (Götz et al. 2010b). Ce travail a notamment permis d'identifier des substances spécifiques à la Suisse (annexe A1), pour lesquelles on a établi des critères de qualité en se fondant sur les exigences de la directive européenne sur l'eau (Commission européenne 2010). Certaines des substances considérées étant également mentionnées dans cette directive et faisant l'objet d'études dans des Etats membres de l'UE, ces travaux ont été soigneusement harmonisés avec des partenaires des instances compétentes au sein de l'Union européenne.

Critères de qualité pour des substances «typiquement suisses»

2.3.1 Eaux de surface en Suisse: état des lieux

Ces cinquante dernières années, la construction et l'extension des STEP ont grandement amélioré la qualité de l'eau. Grâce aux performances des systèmes d'assainissement, les apports de substances organiques dissoutes et en suspension, de métaux lourds et de nutriments (azote et phosphore) ont considérablement reculé.

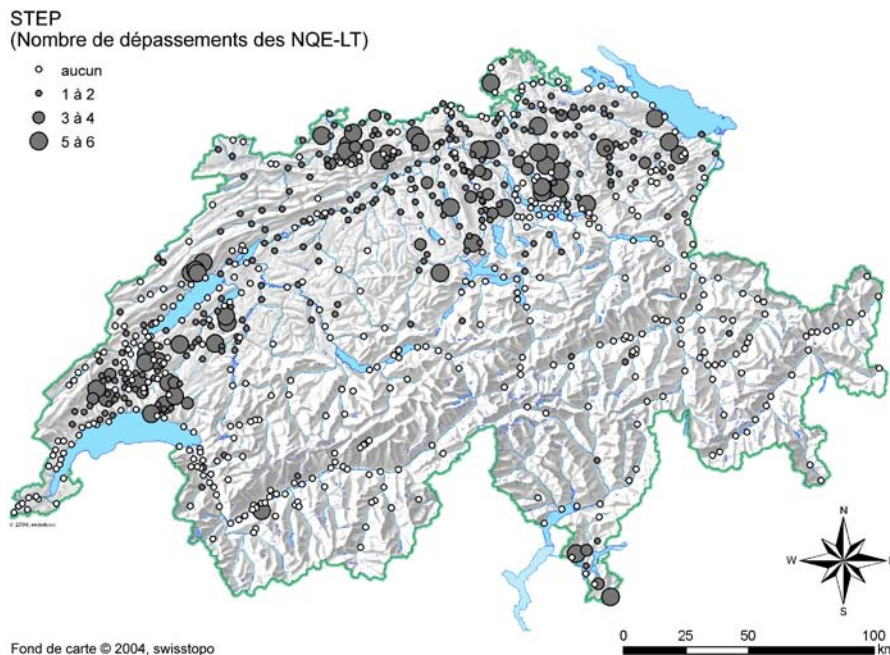
L'analyse de la situation dans les cours d'eau et lacs suisses a cependant révélé que, malgré des instruments légaux efficaces et un équipement remarquable des stations d'épuration, certaines substances passent à travers les mailles du filet pour parvenir dans les eaux (Gälli et al. 2009; Ort et al. 2007; Schärer et al. 2010). Les micropolluants posent surtout problème dans les cours d'eau de taille petite à moyenne qui irriguent les régions à forte densité de population, et c'est en particulier dans les cours d'eau charriant une grande proportion d'eaux traitées que diverses substances atteignent des concentrations qui dépassent des critères probants de qualité écotoxicologique. Si l'on considère les cours d'eau les plus pollués, on peut supposer que plusieurs substances dépassent simultanément les critères de qualité (fig. 3). Diverses campagnes de mesure menées dans des cours d'eau où les eaux traitées sont peu diluées ont confirmé ce constat.

Les apports de nutriments et de métaux lourds ont diminué

Les micropolluants posent surtout problème dans les petits cours d'eau

Fig. 3 > Dépassements des critères de qualité pour six micropolluants dans divers tronçons de cours d'eau suisses

Les concentrations de quinze micropolluants ont été modélisées pour un débit d'étiage (Q_{347}). Au maximum, six d'entre eux (azithromycine, carbamazépine, clarithromycine, diazinone, diclofénac, ibuprofène) ont dépassé le critère de qualité proposé pour les diverses substances (NQE-LT). Les charges les plus élevées ont été mesurées dans de petits cours d'eau du Plateau suisse.



Les concentrations ont été calculées à l'aide du modèle national du flux des substances (Ort et al. 2007 et 2009) en tenant compte des derniers critères de qualité proposés (Okotoxzentrum 2011). Les plus importants métabolites connus de la carbamazépine et du diclofénac ont été pris en considération.

Au cours d'une campagne de mesure menée en 2010 auprès de différentes STEP suisses, on a soumis les échantillons d'eaux traitées de dix stations à une méthode de screening en quête de 120 composés traces organiques. Le plus souvent, on en a décelé entre 60 et 70. La somme des concentrations des substances identifiées dépassait partout 50 µg/l. Force est de supposer que la concentration totale des composés traces organiques (et des produits de leur transformation) est encore sensiblement plus élevée. Une étude antérieure avait en effet estimé que les composés traces organiques représentent plus de 10 %, soit une quantité de l'ordre du milligramme par litre, du carbone réfractaire présent dans l'effluent des STEP (Schluep et al. 2006).

La somme des micropolluants atteint quelques milligrammes par litre

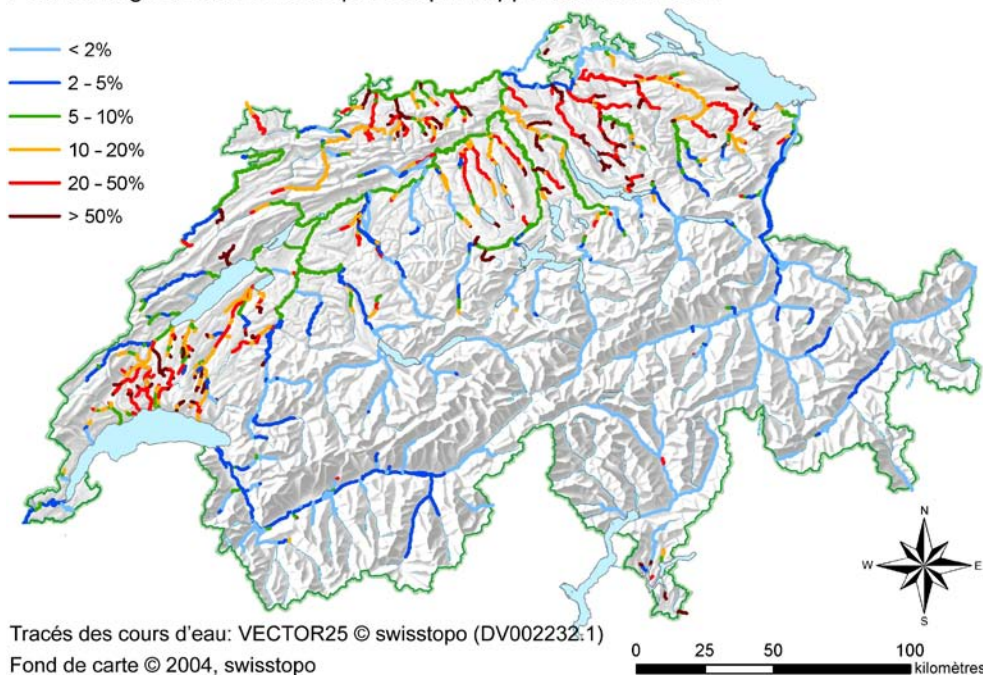
Ces observations donnent à penser que les mélanges de substances ont sans doute aussi un impact sur les eaux. On peut apprécier l'importance de la charge de ces mélanges en considérant la proportion d'eaux traitées dans les eaux (fig. 4).

Proportion d'eaux traitées dans les eaux

Fig. 4 > Proportion d'eaux usées épurées dans les cours d'eau suisses

Proportion d'eaux usées épurées dans les cours d'eau suisses pour le débit minimal (Q_{347}). C'est surtout dans les cours d'eau de taille petite à moyenne du Plateau suisse que cette proportion dépasse 10 %.

Pourcentage d'eaux usées épurées par rapport au débit Q347



OFEV 2010

De fortes proportions d'eaux traitées dans les cours d'eau peuvent également contaminer les ressources en eau potable. C'est surtout dans le cas de rivières s'écoulant sur de la roche meuble que des composés difficilement dégradables provenant des eaux usées urbaines parviennent par infiltration dans les eaux souterraines (Blüm et al. 2005; Hanke et al. 2007; Reinhardt et al. 2010). Même si ces substances ne représentent,

Pollution des ressources en eau potable

selon les connaissances actuelles, aucun risque pour la santé des êtres humains, elles constituent un défi croissant pour la production d'eau potable.

Des études menées dans divers pays de l'UE débouchent sur des résultats comparables. C'est également dans les régions à forte densité de population (Ruhr en Allemagne et Pays-Bas, p. ex.) que l'on mesure une forte charge de composés traces organiques dans les cours d'eau (p. ex. Pinnekamp et al. 2008, CIPR 2010a et 2010b).

L'UE est confrontée à une situation similaire

2.3.2 Rôle des composés traces dans la protection des eaux

La législation suisse sur la protection des eaux a pour but de protéger les eaux contre toute atteinte nuisible (art. 1 LEaux). La LEaux vise notamment à:

Loi sur la protection des eaux (LEaux)

- a) préserver la santé des êtres humains, des animaux et des plantes;
- b) garantir l'approvisionnement en eau potable et en eau d'usage industriel et promouvoir un usage économe de l'eau;
- c) sauvegarder les biotopes naturels abritant la faune et la flore indigènes;
- d) sauvegarder les eaux piscicoles.

La législation poursuit deux objectifs en matière de protection:

- > *Sauvegarder les écosystèmes*: Par sauvegarde, on entend la protection contre les atteintes nuisibles. Dans le domaine des micropolluants, cette sauvegarde exige d'optimiser la protection des eaux.
- > *Préserver les ressources en eau potable*: En Suisse, une partie de l'eau potable provient directement ou indirectement des eaux de surface. Bien que les composés traces organiques ne représentent, selon les connaissances actuelles, aucun risque pour les êtres humains, il importe, conformément au principe de précaution, de réduire les apports de substances dans les réserves d'eau potable déjà contaminées et de protéger l'ensemble des ressources en eau potable contre de tels apports.

C'est surtout dans les régions très peuplées de Suisse que les micropolluants détériorent la qualité de l'eau (fig. 3 et fig. 9). Or, au cours de ces dernières années et décennies, on a observé un accroissement de la population dans ces régions. En principe, on peut donc admettre que la charge des eaux en diverses substances continuera d'augmenter. Voici les facteurs qui favorisent cette hausse:

La charge de micropolluants s'accroît

- > Maintien de la croissance démographique.
- > Modification de la structure démographique: accroissement de la population âgée (consommation de médicaments à la hausse).
- > Poursuite de la «chimisation» de l'environnement (complexité croissante de la composition des produits, p. ex.).
- > Changement climatique: allongement des périodes d'étéage, d'où dilution moindre des eaux usées traitées.

2.4 Mesures visant à réduire les apports de micropolluants

L'analyse de la situation révèle qu'une optimisation de l'assainissement sur le Plateau suisse pourrait réduire l'apport de micropolluants. Pour évaluer et atténuer la pollution des eaux, on peut faire appel à différents moyens.

Il est possible de réduire la charge de micropolluants

2.4.1 Mesures à la source

Les mesures à la source apportent une aide cruciale pour réduire l'apport de substances dans les eaux. Elles comprennent par exemple des mesures législatives, telles les procédures d'autorisation pour les substances ayant un impact sur l'environnement, l'interdiction ou la restriction de l'utilisation et la notification des quantités de substances particulièrement dangereuses mises en circulation. En Suisse, ces prescriptions figurent dans l'ordonnance sur les produits chimiques (OChim), l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim), l'ordonnance sur les produits phytosanitaires (PPh) et l'ordonnance sur les produits biocides (PBio). Il est également possible de réduire les émissions en misant sur des méthodes incitatives (taxe d'incitation sur les COV) ou sur une conception «intelligente» des produits (p. ex. machine à laver le linge utilisant peu de détergent), voire en influant sur la consommation (campagnes ciblées d'information, systèmes de consignes ou filières appropriées d'élimination). Le nouveau règlement de l'Union européenne sur les substances chimiques (Parlement européen 2007), en vigueur depuis juin 2007, va dans ce sens. Ce règlement, abrégé REACH, vise notamment à restreindre le recours à des produits chimiques aux seules utilisations autorisées.

Interdire et restreindre l'emploi

2.4.2 Mesures décentralisées et mesures à l'échelle du bassin versant

L'idée d'optimiser les systèmes d'assainissement en appliquant des mesures organisationnelles dans la zone de collecte n'a rien de nouveau. Du point de vue technique, il s'avère souvent judicieux de raccorder le cas échéant des petites stations d'épuration, parfois peu efficaces, à des stations plus grandes, qui répondent aux exigences techniques les plus récentes et dont l'exploitation est optimale. Selon la situation géographique, les eaux traitées pourront de plus être déversées dans des cours d'eau plus grands, où elles seront mieux diluées. La tendance au regroupement (des STEP moins nombreuses, mais plus efficaces, desservant des zones de collecte plus grandes) ouvre la voie à de nouvelles formes d'organisation, qui peuvent se doter de services professionnels dont les spécialistes seront chargés d'assurer le bon fonctionnement et l'entretien des installations. A terme, de telles solutions devraient permettre de réaliser des économies substantielles, tout en améliorant l'efficacité des installations. Outre les aspects techniques, l'évaluation de futurs regroupements doit également considérer d'autres conséquences (gestion intégrée par bassin versant, cf. Agenda 21 pour l'eau).

Le regroupement de STEP s'avère souvent judicieux

On peut également envisager des mesures techniques ciblées, afin de réduire la charge rejetée par les principales sources de micropolluants (séparation et élimination directe d'eaux usées très polluées, prétraitement spécifique, etc.). Ces mesures décentralisées sont utiles lorsqu'une ou plusieurs sources ponctuelles sont responsables d'une grande

Mesures techniques décentralisées

partie de la charge totale dans une zone de collecte (grandes entreprises industrielles p. ex., voire hôpitaux ou homes pour personnes âgées (Brügger et al. 2010, McArdelle et al. 2011, Flöser et Beier 2010)).

Un moyen non négligeable de réduire les apports de substances consiste à intervenir au niveau des réseaux d'égouts publics et privés. Les mesures comprennent notamment le dimensionnement suffisant des bassins de rétention dans les réseaux unitaires ainsi que leur entretien approprié.

Mesures au niveau du réseau d'égouts

2.4.3 Mesures centralisées à la STEP (en bout de chaîne)

L'approche «en bout de chaîne» désigne toutes les mesures conduisant à une nette amélioration du rendement d'épuration des STEP. La majeure partie des micropolluants parvenant dans les eaux par le biais des réseaux d'assainissement, les stations d'épuration revêtent en effet une importance cruciale.

Une étape de traitement supplémentaire à la STEP s'impose

- > L'efficacité de l'épuration biologique des STEP pour éliminer les micropolluants dépend plus ou moins du procédé appliqué. En incluant la nitrification dans leur filière de traitement, les installations qui se contentent de dégrader le carbone peuvent en principe améliorer légèrement leur rendement.
- > *Procédés d'épuration supplémentaires*: le seul moyen de réduire de manière notable l'apport de composés traces organiques par le biais des réseaux d'assainissement consiste à doter certaines STEP d'étapes de traitement supplémentaires. Selon les connaissances actuelles, les procédés à envisager sont notamment l'ozonation et l'adsorption sur du charbon actif. Le chapitre 4 fournit un aperçu des divers procédés et de leur capacité à éliminer les micropolluants. Pour équiper une STEP existante d'un procédé d'épuration plus poussé, il faut toutefois disposer de place et d'énergie et compter avec une hausse des frais d'exploitation.

2.5 Constat

Les préparatifs du projet «Stratégie Micropoll» et les travaux réalisés au cours des étapes Analyse de la situation/preuve du besoin d'intervenir et Système d'évaluation permettent de dégager les constats suivants:

- > Bien que plus de 90 % des eaux usées produites en Suisse soient traitées dans des STEP, les eaux épurées sont la principale source ponctuelle de divers micropolluants. Des relevés et des modèles de calcul montrent que les cours d'eau où la proportion d'eaux traitées est élevée ne sont pas en mesure de respecter les objectifs de qualité proposés pour diverses substances.
- > Présents dans les eaux, les micropolluants ont des effets nocifs sur les organismes aquatiques. On a par ailleurs détecté la présence de micropolluants provenant des eaux usées urbaines dans des réserves d'eau potable contaminées.

Pollution des eaux en Suisse

Effets nocifs dans les eaux

-
- | | |
|---|--|
| <p>> L'analyse de la situation a révélé que c'est surtout dans les zones à forte densité de population du Plateau suisse que des mesures s'imposent pour réduire l'apport de substances, afin de protéger les écosystèmes aquatiques et les ressources en eau potable.</p> | <p>Il est nécessaire de réduire l'apport de micropolluants</p> |
| <p>> Pour réduire l'apport de composés traces organiques dans les eaux, il est possible d'intervenir au niveau de la législation, ainsi que de prendre des mesures à la source, au niveau du bassin versant ou en bout de chaîne en optimisant l'équipement des STEP. Vu la variété des substances concernées, de leurs utilisations et de leurs voies d'apport, ni les mesures législatives ni les mesures à la source ne sont à même de réduire de manière significative les apports dans toute la Suisse. Les mesures au niveau des STEP communales peuvent toutefois améliorer sensiblement la qualité des eaux là où la proportion d'eaux traitées est élevée. Quoiqu'il en soit il importe toujours d'appliquer les mesures en se fondant sur une approche globale et en tenant compte d'autres éléments, telles l'efficacité et la rentabilité.</p> | <p>Il est judicieux d'associer plusieurs types de mesures</p> |

3 > L'épuration actuelle des eaux en Suisse

Au cours des dernières décennies, l'épuration des eaux a sans cesse dû relever de nouveaux défis. Aujourd'hui, elle élimine ainsi la plupart des matières solides et des substances organiques facilement dégradables, de même que les nutriments azote et phosphore. Equipées d'un procédé supplémentaire, les STEP seraient à même de retenir également les micropolluants.

3.1 Mission de l'évacuation des eaux urbaines et de l'épuration des eaux

Les égouts, tels que nous les connaissons aujourd'hui, n'ont été posés dans la plupart des villes suisses que vers la fin du XIX^e ou au début du XX^e siècle (Brentano 1934). Les réseaux mis en place offraient deux gros avantages: l'évacuation souterraine des eaux usées et des eaux pluviales a, d'une part, amélioré les conditions d'hygiène; d'autre part, les agglomérations furent ainsi mieux protégées contre les inondations. Selon un sondage réalisé en 2007 par le *British Medical Journal*, la «révolution sanitaire» (introduction des réseaux d'assainissement et des réseaux d'eau potable) est perçue comme le principal progrès médical depuis 1840, dépassant même par son importance la découverte des antibiotiques (Ferriman 2007).

La pose d'égouts a amélioré les conditions d'hygiène

Comme les eaux usées étaient déversées dans les eaux de surface, l'accroissement de la population et de sa densité ont détérioré la qualité des eaux en Suisse, de sorte que les premières stations d'épuration, purement mécaniques, ont rapidement été dotées d'une étape de traitement biologique (en 1917 à Saint-Gall). Voici quelle était, à l'époque, la mission de l'évacuation des eaux urbaines et de l'épuration des eaux:

Mission: garantir l'hygiène, évacuer les eaux pluviales, protéger les eaux

- > garantir l'hygiène dans les zones habitées;
- > dériver et évacuer les eaux pluviales afin d'éviter les inondations dans les zones habitées;
- > protéger les eaux contre les atteintes nuisibles.

Dès les années 1960, les milieux politiques ont inscrit cette mission dans la législation sur la protection de l'environnement et des eaux et on la retrouve dans le droit suisse actuel sur la protection des eaux (art. 1, ainsi qu'art. 6 et 7 LEaux, p. ex.).

3.2

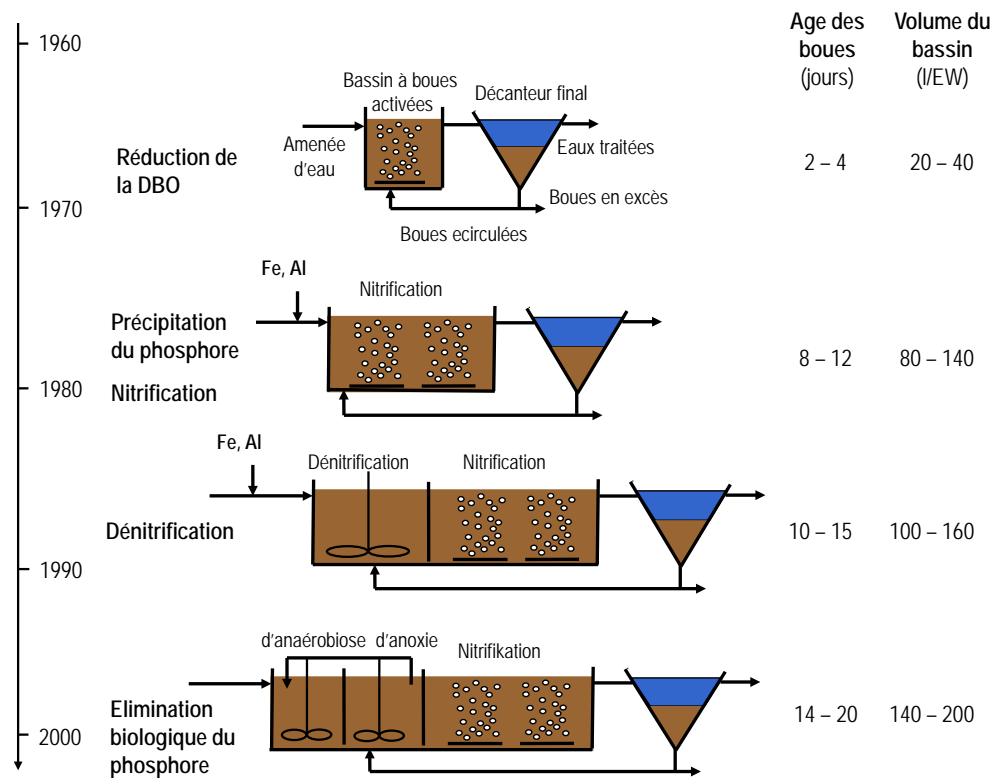
L'épuration des eaux aujourd'hui

Les premières stations d'épuration, purement mécaniques, servaient à extraire les matières solides des eaux usées. La croissance constante de la population et de sa densité, qui augmentait d'autant l'apport de substances dans les eaux, de même que des conflits d'intérêts ont accru les exigences posées à l'épuration des eaux (fig. 5).

Accroissement des exigences en matière d'épuration

Fig. 5 > Amélioration progressive de l'épuration des eaux durant ces dernières décennies

Les STEP suisses se sont peu à peu dotées de traitements nouveaux, afin de pouvoir réagir aux problèmes de la protection des eaux. L'eutrophisation des lacs du Plateau a ainsi conduit à l'introduction de l'épuration chimique (élimination des phosphates). Cette évolution de l'épuration est appelée à se poursuivre.



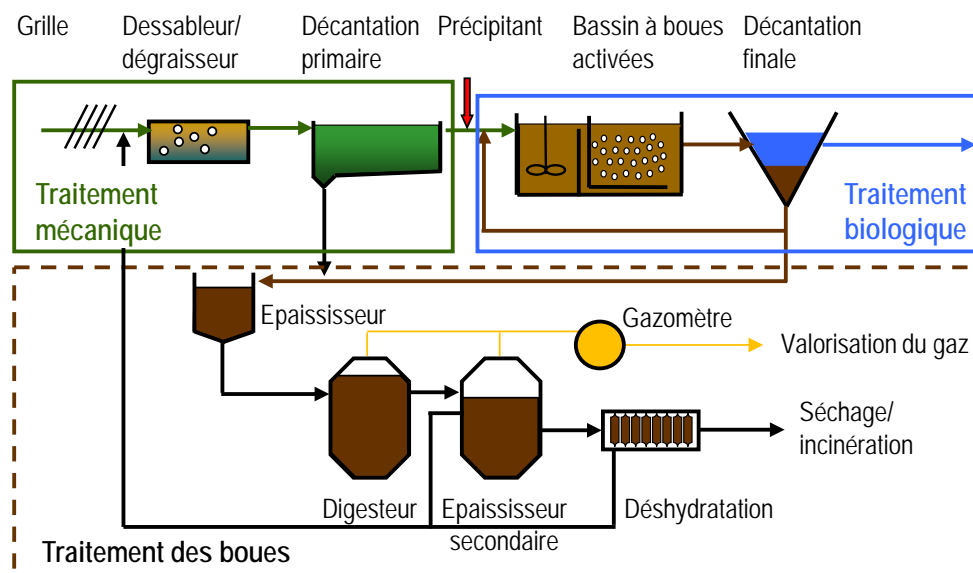
Siegrist et al. 2003

Les STEP actuelles sont conçues pour éliminer ou dégrader les matières solides, les substances organiques facilement à moyennement dégradables, l'azote et le phosphore. De plus, elles piègent nombre de composés organiques et de métaux lourds dans les boues d'épuration et éliminent partiellement les germes pathogènes. Pour parvenir à ce résultat, plusieurs étapes d'épuration sont nécessaires. La fig. 6 illustre une filière d'épuration typique.

Les STEP éliminent beaucoup de substances

Fig. 6 > Filière typique d'épuration des eaux usées dans une STEP suisse

Une STEP comprend en général des étapes d'épuration mécanique, biologique et chimique, ainsi qu'un traitement des boues d'épuration. L'exemple ne comprend pas de filtration finale, dont sont souvent équipées les STEP qui déversent leur effluent dans un lac ou dans un cours d'eau sensible.



Graphique d'après Gujer 2002

Les STEP actuelles comportent habituellement trois étapes d'épuration, plus le traitement des boues :

- > **Traitement mécanique :** Le traitement mécanique comprend le dégrillage, le tamisage, le dessablage, la séparation d'huiles et de graisses, ainsi que la décantation primaire. Ce traitement sert à éliminer les matières grossières, ainsi que les substances d'une densité plus ou moins élevée. Une partie de ces substances sera ensuite traitée avec les boues d'épuration, le reste est incinéré ou mis en décharge.
- > **Traitement biologique :** Le traitement biologique consiste à dégrader, c'est-à-dire à transformer, les substances organiques dissoutes dans les eaux usées. Une partie d'entre elles servent à accroître la biomasse (boues activées), une autre partie est transformée en CO_2 et le reste (une quantité minime) se déverse dans les eaux avec l'effluent de la STEP. Selon la capacité de la STEP, le traitement biologique transforme également l'ammonium en nitrate (nitrification), puis le nitrate en azote at-

Traitement mécanique :
élimination des matières solides

Traitement biologique : dégradation des substances dissoutes

mosphérique (dénitrification). Une partie de l'azote et du phosphore sont piégés dans les boues d'épuration.

- > *Traitement chimique:* Le traitement chimique élimine le phosphate excédentaire. Cette opération est en général assurée par l'adjonction de précipitants (sels de fer ou d'aluminium) au cours du traitement mécanique ou biologique. Les précipitants réagissent avec le phosphate pour former des complexes métal-phosphates, qui sont ensuite éliminés avec les boues d'épuration. Les installations dotées d'un procédé d'élimination biologique du phosphore sont à même de remplacer, en partie au moins, l'élimination chimique du phosphore.
- > *Traitement des boues:* Les boues d'épuration sont épaissies, partiellement digérées (production de gaz d'épuration), déshydratées, éventuellement séchées et, enfin, incinérées. Ces boues pouvant contenir des agents pathogènes, des métaux lourds et des polluants organiques, leur épandage sur des surfaces agricoles est interdit en Suisse depuis 2008. La valorisation du gaz d'épuration permet de produire de l'énergie.

Traitement chimique: élimination du phosphore

Traitement des boues: valorisation et élimination des boues d'épuration

3.3 Equipement des stations d'épuration communales

La Suisse compte environ 750 stations d'épuration d'une taille supérieure à 500 équivalents-habitants (EH) (OFEV 2006). Les neuf plus grandes STEP (1,2 %) traitent environ un quart de toutes les eaux usées, tandis que les «petites» (moins de 10 000 EH) en traitent à peine 20 %. Le degré d'équipement des stations suisses est relativement élevé. Selon les étapes de traitement dont elles disposent, l'OFEV les classe dans différentes catégories (tab. 1). Toutes assurent un traitement mécanique et, à l'exception de quelques rares petites STEP, toutes offrent un traitement biologique (fig. 7).

La Suisse compte plus de 700 STEP

Tab. 1 > Classement des STEP selon les étapes de traitement disponibles

Catégorie	Traitement biologique	Elimination du phosphore	Filtration	Nitrification	Dénitrification	Traitement supplémentaire
A	x					
B	x	x				
C	x	x	x			
D	x			x		
E	x	x		x		
F	x	x	x	x		
G	x			x	x	
H	x	x		x	x	
I	x	x	x	x	x	
J	x	x	x	x	x	x

VSA/FES 2006

Les fig. 7 et fig. 8 illustrent la capacité de traitement des STEP selon les étapes d'épuration disponibles et selon le volume des eaux traitées. Plus de 60 % des eaux usées sont traitées dans des installations assurant la nitrification (catégories D à J) et pratiquement toutes les STEP (96 % des eaux usées) éliminent le phosphore.

Capacité de traitement élevée

Fig. 7 > Nombre de STEP par catégorie

Répartition des STEP dans les diverses catégories.

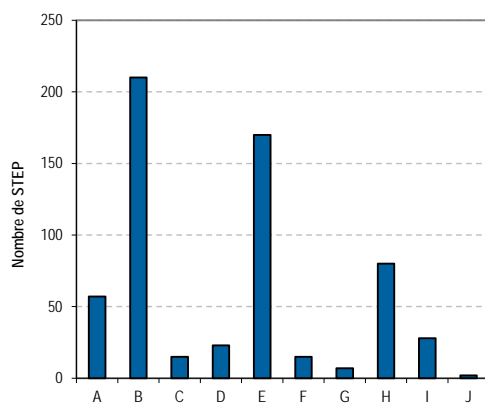
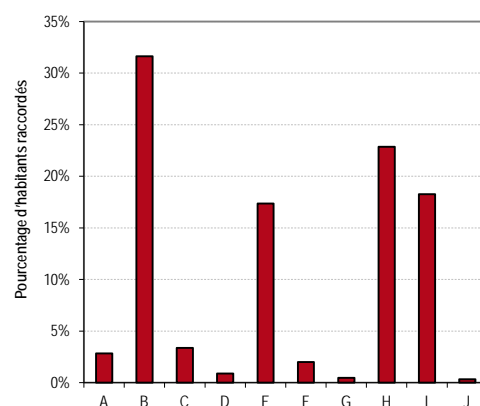


Fig. 8 > Habitants raccordés par catégorie

Environ 60 % des eaux usées suisses subissent une nitrification.



Source: Base de données des stations d'épuration suisses (OFEV), comprenant les données de 630 STEP

3.4 Coûts et prestations de l'épuration des eaux

3.4.1 Rendement d'épuration

Le tab. 2 fournit quelques chiffres sur l'épuration des eaux usées en Suisse. Bien que seulement 40 % environ des eaux usées soient traitées dans des installations à même de dégrader les composés azotés (fig. 8, catégories G à I), le taux d'élimination de cet élément avoisine 45 %. Ce résultat est dû non seulement à la dénitrification mais aussi à l'intégration de l'azote dans les boues d'épuration. Comme environ 95 % des eaux usées subissent un traitement destiné à éliminer le phosphore, 90 % de cet élément sont piégés dans les boues d'épuration. Les réserves de phosphore n'étant pas illimitées, il serait judicieux, à l'avenir, de considérer les boues d'épuration comme une ressource et de récupérer le phosphore dès que des procédés efficaces et rentables auront été mis au point (Hermann 2009). Un recyclage efficace pourrait couvrir presque toute la demande suisse de phosphore pour les engrais minéraux.

Les STEP contribuent largement à la protection des eaux

Tab. 2 > Quelques paramètres de l'épuration des eaux usées en Suisse

Capacité des stations d'épuration actuelles à éliminer ou à transformer les principaux composants des eaux usées.

	Quantité à l'entrée de la STEP	Quantités dans l'effluent	Elimination	Source
Eaux usées [mio m ³ /a]	1410			VSA et IC 2011
DCO [t/a]	490 000	37 000	92 %	VSA et IC 2011
Azote	40 000	21 000	47 %	VSA et IC 2011
Phosphore	6400	720	89 %	VSA et IC 2011
Boues d'épuration [t MS/a]	200 000			Hermann 2009

3.4.2 Consommation énergétique et coût de l'épuration des eaux usées

Tant la consommation énergétique que les coûts spécifiques d'investissement et d'exploitation d'une STEP dépendent de sa taille, des procédés appliqués, du rendement d'épuration et du mode de traitement des boues. La majeure partie de l'énergie consommée par les STEP étant de l'électricité, énergie et courant électrique sont considérés comme synonymes ci-après. Le tab. 3 indique la moyenne de la consommation et des coûts énergétiques pour différentes tailles de stations d'épuration. La conversion des coûts spécifiques se fonde sur un volume moyen d'eaux usées de 125 m³/EH/a (VSA et IC 2011).

Tab. 3 > Consommation énergétique et coûts spécifiques de l'épuration des eaux en fonction de la taille de la station d'épuration

Consommation d'énergie et coûts dépendent de la taille de la STEP. La colonne «coûts à la STEP» n'indique que les coûts de l'épuration des eaux usées (coût du capital et frais d'exploitation); la colonne «total des coûts» englobe, en plus, le coût du capital et les frais d'exploitation du réseau d'égouts. Ces données se fondent sur un volume moyen d'eaux usées de 125 m³/EH/a.

	Energie		Coûts à la STEP		Total des coûts	
	kWh/m ³	kWh/EH/a	Fr./m ³	Fr./EH/a	Fr./m ³	Fr./EH/a
100–1000	0,64	80	1.90	239	3.15	395
1000–10 000	0,40	51	1.20	149	2.30	289
10 000–50 000	0,31	39	0.70	90	1.55	194
> 50 000	0,31	40	0.55	67	1.35	172
Moyenne suisse	0,33	41	0.71	89	1.60	199

Source: VSA et IC 2011; quantité moyenne d'eaux usées = 125 m³/EH/a

La consommation spécifique brute d'énergie (qui ne tient pas compte de l'énergie produite à la STEP) avoisine 0,33 kWh/m³ d'eaux usées (VSA et IC 2011) ou 41 kWh/EH/a. Comme nombre de STEP produisent du courant (et/ou de la chaleur) en valorisant les boues d'épuration, la consommation nette (courant prélevé dans le réseau) est inférieure, car le taux d'auto-alimentation varie énormément. En 2001, la consommation totale des STEP suisses a atteint environ 420 GWh/a (VSA et Suisse-énergie 2010) et se situe aujourd'hui entre 450 et 510 GWh/a (estimation VSA et IC 2011, Kind et Levy 2012), ce qui équivaut à 0,8 % environ de la consommation suisse d'électricité. A l'inverse, les STEP suisses ont produit 116 GWh de courant en 2009 (OFEN 2010). Ces chiffres ne prennent pas en compte la valorisation des boues d'épuration, aujourd'hui incinérées dans des installations spéciales de valorisation des boues, des usines d'incinération des ordures ménagères ou des cimenteries.

Consommation d'électricité des STEP suisses: env. 480 GWh/a

Le coût total (exploitation et amortissement) de l'épuration des eaux (STEP seules) avoisine 1 milliard de francs par an, le coût total de l'assainissement (STEP et réseaux d'égouts) atteint quant à lui 2,2 milliards (VSA et IC 2011).

Coût annuel de l'épuration des eaux usées: env. 1 milliard de francs

3.4.3 Perspectives de l'épuration des eaux usées

L'épuration des eaux usées en Suisse dispose aujourd'hui d'un équipement très performant et affiche des rendements très élevés, et il est difficile de prévoir l'évolution future de sa consommation énergétique et de ses coûts. Si la professionnalisation constante et l'accroissement de l'efficacité contribuent à les diminuer, les exigences croissantes en matière de qualité tendent à les accroître.

La protection des eaux restera un objectif prioritaire, de sorte que l'évolution technique des STEP ne peut que se poursuivre. La rétention de substances indésirables, comme les micropolluants, les nanoparticules et les germes pathogènes, va gagner en importance. Les ressources étant par ailleurs limitées, la récupération de certaines substances (phosphore ou biopolymères présents dans les boues) et d'énergie va s'imposer avec le temps. La raréfaction des précipitations, qui rendra les pénuries (saisonniers) d'eau plus problématiques, favorisera même le recyclage des eaux usées traitées, par exemple comme eau d'usage industriel et artisanal.

Les STEP sont appelées à évoluer sans cesse

3.5 Elimination des micropolluants dans les STEP actuelles

Les STEP communales actuelles n'ont pas été conçues pour éliminer les micropolluants. Leurs diverses étapes de traitement retiennent ou dégradent certes beaucoup de composés organiques dégradables, mais n'éliminent qu'insuffisamment, voire pas du tout, nombre de micropolluants difficilement dégradables.

Micropolluants courants dans les eaux usées urbaines suisses

Pour connaître la charge d'eaux usées dans les eaux ou pour mener des études analytiques dans les cours d'eau et les STEP (afin de déterminer par exemple les taux d'élimination des composés traces), on peut mesurer les micropolluants les plus courants, car ils sont représentatifs de l'ensemble des micropolluants provenant des eaux usées. Une liste de ces substances dites «typiquement suisses» a été établie dans le cadre du projet «Stratégie Micropoll»; elle compte une quarantaine de substances (Götz et al. 2010b).

Voici les cinq micropolluants le plus souvent mentionnés:

- > benzotriazole (inhibiteur de corrosion entrant dans la composition des produits de rinçage pour lave-vaisselle),
- > carbamazépine (antiépileptique),
- > diclofénac (analgésique),
- > mécoprop (produit phytosanitaire et agent de protection des matériaux),
- > sulfaméthoxazole (antibiotique).

Ces cinq substances sont largement et couramment utilisées en Suisse et les STEP ne les éliminent qu'insuffisamment, voire pas du tout, des eaux usées. Voilà pourquoi on les rencontre souvent dans les eaux.

Selon le micropolluant considéré, le taux d'élimination à la STEP varie entre 0 et près de 100 %. Dans les STEP dépourvues d'une étape de traitement supplémentaire, les micropolluants sont principalement éliminés par adsorption sur des matières solides (boues) et par dégradation ou transformation biologique. Leur élimination dépend en premier lieu de leurs propriétés, puis du degré d'équipement de la STEP. Ce sont surtout la répartition entre la phase solide et la phase aqueuse et la biodégradabilité des substances qui sont décisives. Les étapes de traitement existantes ne parviennent donc guère à retenir les micropolluants hydrophiles et difficilement dégradables, dont la majeure partie parvient dans les eaux avec l'effluent de la STEP. Quoi qu'il en soit, le traitement biologique d'une STEP diminue toutefois nettement la toxicité des eaux usées pour les organismes aquatiques.

L'élimination dépend avant tout des propriétés d'une substance

Pour ce qui est du rôle de l'équipement dans la capacité d'élimination, on peut distinguer les STEP avec et sans nitrification: le taux moyen d'élimination des micropolluants (élimination moyenne de toutes les substances mesurées) se situe entre 40 et 50 % pour les STEP avec nitrification (âge des boues: env. 10 jours), alors qu'il avoisine 20 % pour les STEP sans nitrification (âge des boues: 1 à 4 jours). Une hausse supplémentaire de l'âge des boues n'améliore pas de manière significative le taux (moyen) d'élimination.

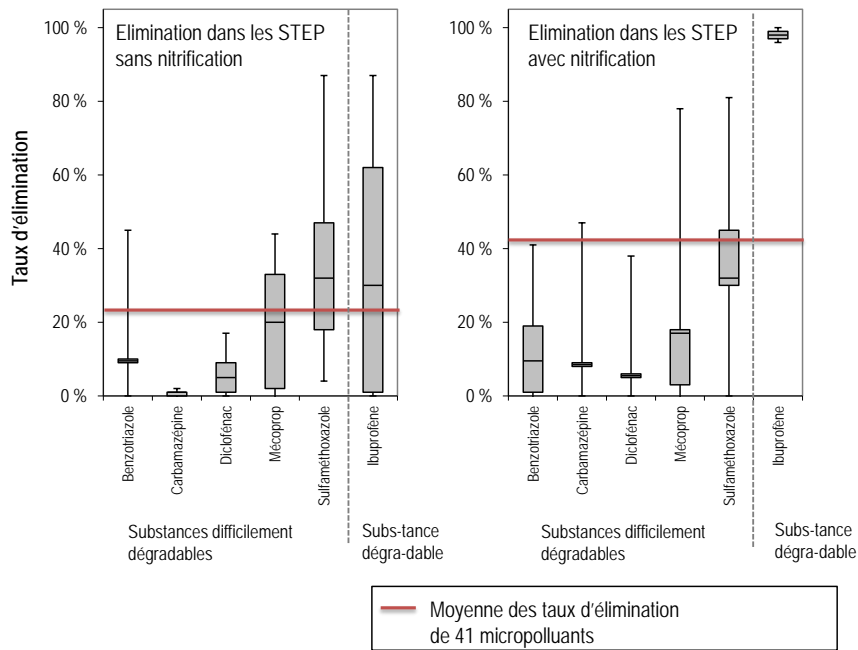
Taux d'élimination légèrement plus élevé dans les STEP avec nitrification

La fig. 9 illustre le taux moyen d'élimination d'une sélection de micropolluants que l'on rencontre fréquemment dans les STEP communales. Avec ou sans nitrification, les STEP ne sont pas en mesure d'éliminer une part notable des substances persistantes que sont le benzotriazole, la carbamazépine, le diclofénac, le mécoprop et le sulfaméthoxazole (cf. encadré page 35). Il existe pourtant des substances sur lesquelles la nitri-

fication agit. C'est le cas de l'ibuprofène (un antirhumatismal), qui n'est toutefois éliminé que lorsque les boues atteignent un certain âge.

Fig. 9 > Elimination des micropolluants dans les STEP actuelles

Taux d'élimination de six micropolluants largement répandus dans les STEP avec et sans nitrification. Au total, on a déterminé les taux d'élimination de 41 substances; le trait rouge représente la moyenne de ce taux.



Source des données: Abegglen et al. 2010

3.6

Constat

- > L'épuration des eaux a pour principal objectif de protéger les eaux contre les atteintes nuisibles. Le bon équipement des STEP suisses contribue largement à préserver la qualité des eaux de surface.
- > Les STEP actuelles ne parviennent pas à éliminer suffisamment les micropolluants, de sorte que leurs effluents sont la principale voie d'un apport constant de diverses de ces substances dans les eaux. A l'avenir, les STEP communales devront donc se doter d'une étape de traitement plus poussée.
- > Le coût annuel de l'épuration des eaux se monte à près de 1 milliard de francs, soit 130 francs par habitant (ou 90 fr./EH/a).
- > La consommation brute d'électricité des STEP suisses se situe entre 450 et 510 GWh par an, soit l'équivalent de 0,33 kWh/m³. Environ un quart de cette consommation (env. 120 GWh/a) est couvert par la valorisation du gaz d'épuration obtenu à partir des boues.

Principal objectif: protéger les eaux

Les STEP actuelles n'éliminent qu'insuffisamment les micropolluants

Coût annuel de l'épuration des eaux usées: env. 130 francs par habitant

Taux d'auto-approvisionnement: 25 %

4 > Procédés d'élimination des micropolluants

Que ce soit pour conditionner l'eau potable ou traiter les eaux de baignade et les eaux industrielles, on connaît d'ores et déjà toute une gamme de procédés à même d'éliminer les micropolluants. Selon les connaissances actuelles, ce sont l'ozonation et le traitement au charbon actif en poudre qui conviennent le mieux pour les eaux usées urbaines. Il existe certes d'autres procédés, mais ils doivent encore faire l'objet de recherches ou ne sont pas appropriés.

4.1 Aperçu des procédés existants

Seul l'ajout d'une étape de traitement supplémentaire permettra aux STEP communales d'améliorer leur taux d'élimination des micropolluants. Pour conditionner l'eau potable ou traiter les eaux de baignade et les eaux industrielles, on utilise déjà divers procédés afin d'éliminer des substances ou des groupes de substances spécifiques. Ces procédés se répartissent dans quatre catégories en fonction de leur mode d'action:

Divers procédés techniques sont envisageables

> **Adsorption:** On met les eaux usées en contact avec un adsorbant doté d'une grande superficie, soit en leur ajoutant une dose d'adsorbant soit en les faisant passer dans un récipient rempli d'adsorbant. Les composants s'agglutinent à la surface de l'adsorbant. Celui-ci se saturant progressivement, il doit être périodiquement enlevé et subir un traitement. Le charbon actif est l'adsorbant à privilégier pour éliminer les composés traces.

Adsorption: les substances se fixent à la surface d'un adsorbant

> **Activité biologique:** Dans les procédés biologiques, les composants des eaux usées sont dégradés ou transformés par des micro-organismes. On ne connaît en général pas les produits de ce processus. Les STEP actuelles possédant déjà une étape de traitement biologique et ne parvenant pas à éliminer suffisamment les micropolluants, les procédés biologiques ne conviennent pas, ou alors uniquement dans des cas particuliers, pour assurer une élimination supplémentaire de ces substances.

Procédés biologiques: les substances sont transformées par des micro-organismes

> **Oxydation:** Les substances sont oxydées, c'est-à-dire que leur structure chimique est modifiée par l'adjonction d'un oxydant dans le flux d'eaux usées. En principe, les substances initiales perdent ainsi leurs propriétés actives, mais se transforment le plus souvent en un produit que l'on ne connaît pas. Les procédés par oxydation comprennent l'ozonation, la chloration, l'oxydation avancée (AOP), la photolyse et le recours au ferrate.

Oxydation: les substances sont transformées sous l'effet d'un oxydant

> *Action physique*: Les procédés physiques comprennent avant tout la filtration (nanofiltration et osmose inverse). Les eaux usées traversent un filtre qui retient les composés en raison de leur taille (ou de leur charge électrique). Le rétentat, dans lequel les polluants sont concentrés, doit subir un traitement ultérieur.

Procédés physiques: les substances sont retenues

Il est également possible de combiner les divers procédés. Le tab. 4 donne un aperçu des procédés envisageables, de leur mode d'action et de leurs applications.

Plusieurs procédés peuvent être combinés

Tab. 4 > Procédés supplémentaires envisageables pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines

Les procédés sont classés selon leur mode d'action.

Procédé	Application (exemples)	Objectif – effet escompté
Procédés par adsorption		
Précipitation/floculation	Traitement des eaux usées urbaines	Précipitation du phosphore
Charbon actif en grains (CAG)	Production d'eau potable	Rétention de composés persistants
Charbon actif en poudre (CAP)	Industrie	Décoloration, rétention de composés persistants
Echangeur d'ions	Industrie, ménages	Adoucissement de l'eau
Nanofloculation	A l'étude	Floculation
Procédés biologiques		
Lagunage	Traitement des eaux usées urbaines	Epuration des eaux usées
Système d'épuration végétale	Traitement des eaux usées urbaines	Epuration des eaux usées
Filtre à sable	Traitement des eaux usées urbaines	Rétention des matières solides
Procédés par oxydation		
Systèmes d'oxydation avancée (<i>advanced oxidation processes</i> , AOP)	Eau potable, eaux industrielles	Dégradation de composés persistants
Chlore, dioxyde de chlore	Production d'eau potable et conditionnement d'eau de baignade	Désinfection
Ferrate	A l'étude	
Ozone	Eau potable et eau de baignade, industrie	Désinfection, dégradation des micropolluants
Photolyse	Production d'eau potable	Désinfection
Procédés physiques et autres		
Nanofiltration/osmose inverse (membranes denses)	Production d'eau potable	Dessalement d'eau de mer
Ultrasons	A l'étude	

Ces procédés ont (presque) tous été mis à l'épreuve pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Certains ont déjà été testés à grande échelle en Suisse et à l'étranger, tandis que d'autres n'ont fait l'objet de tests qu'en laboratoire ou été utilisés à grande échelle dans l'industrie.

L'état des connaissances sur le traitement des eaux usées varie

4.2 Exigences à remplir par un procédé supplémentaire

Pour éliminer les composés traces organiques des eaux usées urbaines, un procédé supplémentaire doit remplir les exigences ci-après:

- > *action à «large spectre»*: le procédé doit éliminer le plus grand nombre de substances problématiques;
- > *sous-produits*: le procédé ne doit pas engendrer l'apparition de sous-produits ou de déchets indésirables;
- > *applicabilité*: le procédé doit s'intégrer dans l'installation existante, pouvoir être exploité par le personnel et ne pas avoir une influence néfaste sur le rendement d'épuration;
- > *coût/utilité*: les dépenses consenties (matériel, énergie, personnel, coût financier) doivent être acceptables et fournir un avantage approprié.

Des procédés ayant fait leurs preuves dans d'autres domaines ne peuvent pas s'appliquer sans autres aux eaux usées. Vu leur composition et leurs propriétés hydrauliques, les eaux usées urbaines imposent des exigences spécifiques. Le tab. 5 indique l'évaluation des divers procédés sur la base des critères mentionnés ci-dessus, ainsi que la possibilité de les appliquer dans des STEP communales.

Les expériences engrangées ne peuvent s'appliquer sans autres aux eaux usées urbaines

Tab. 5 > Appréciation de la capacité de divers procédés à éliminer les micropolluants

Aperçu des procédés envisageables pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. L'évaluation sur la base des quatre critères ci-dessus indique s'ils conviennent ou non pour l'usage requis (pertinence). + = bon, approprié, possible; 0 = neutre (pour le critère «déchets/sous-produits»: solutions existantes); - = insuffisant, problématique, difficile; ? = inconnu, non applicable; R = d'autres recherches sont nécessaires

Procédé	Pertinence/efficacité	Action à large spectre	Déchets/sous-produits	Applicabilité	Coût/utilité	Informations complémentaires
Ozone	+	+	0	+	+	Chapitre 8*, Margot et al. 2011
CAP	+	+	0	+	+	Chapitre 9*, Margot et al. 2011
CAG	+/F	+	0	+	F	Chapitre 10*
Nanofiltration/osmose inverse	-/F	+	-	?	-	Chapitre 10*, à tester pour cas particuliers
Oxydation avancée	-/F	+	0	?	-	Chapitre 10*, à tester pour cas particuliers
Etape biologique supplémentaire	-	-	0	+	0/+	Chapitre 10*
Ferrate	F	0/+	0/-	F	F	Chapitre 10*
Précipitation/floculation	-	-	0	+	+	Sterkele et Gujer 2009
Chlore/dioxyde de chlore	-	-	-	+	+	Lee et von Gunten 2010
Photolyse	-	-	0/-	+/-	0	Kim et al. 2009
Ultrasons	F	F	0/-	?	?	Naddeo et al. 2009
Adsorption	-/F	-	0/-	+	+	Burkhardt M. 2011
Nanotechnologies	?/F	?	?	?	?	Corvini et Shahgaldian 2010

*dans la version allemande de ce rapport

Les divers procédés sont brièvement décrits ci-après (chap. 4.3 à 4.7) et le tab. 10 indique dans quelle mesure ils ont été ou sont utilisés dans la pratique. Selon les connaissances actuelles, ce sont l'ozonation et le traitement au charbon actif en poudre qui sont, en raison de leur action à large spectre et de leur applicabilité, les mieux appropriés pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Moyennant certaines conditions, d'autres procédés peuvent aussi être envisagés. Pour ces derniers procédés, on ne dispose toutefois pas encore de connaissances pratiques suffisantes pour les appliquer au traitement des eaux usées urbaines.

Selon l'état actuel des connaissances, l'ozone et le CAP figurent au premier plan

4.3 Ozone

Les essais réalisés à grande échelle ont montré que le recours à l'ozone permet d'éliminer en grande partie une vaste palette de substances des eaux usées urbaines et qu'il diminue nettement la toxicité des eaux usées pour les organismes aquatiques. Une ozonation s'intègre en général bien dans une station d'épuration existante.

L'ozonation convient pour éliminer les micropolluants

L'ozone est un oxydant puissant, qui s'attaque à certaines doubles liaisons et à certains groupes fonctionnels dans les molécules. Nombre de micropolluants renfermant de telles liaisons et des groupes fonctionnels, l'ozone parvient à les oxyder (donc à les transformer). L'ozone est utilisé depuis des décennies comme désinfectant et agent d'élimination des composants organiques dans la production d'eau potable, le conditionnement d'eau de baignade et le traitement d'eaux industrielles.

L'ozone oxyde une vaste palette de substances

L'ozone ne réagit toutefois pas seulement avec les micropolluants, mais aussi avec la charge organique de fond (COD) et certains autres composants inorganiques des eaux usées (le nitrite, p.ex.). Pour maintenir les besoins en ozone à un niveau aussi faible que possible, l'ozonation n'est dès lors appliquée qu'après un traitement biologique poussé (nitrification tout au long de l'année).

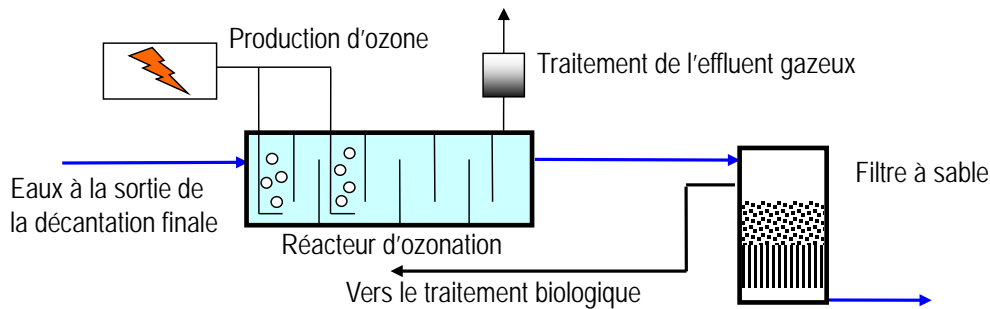
L'ozonation intervient après le traitement biologique

L'ozone doit être produit sur place dans un générateur d'ozone, pour être ensuite injecté sous forme gazeuse dans les eaux à traiter (fig. 10). Comme gaz initial, on utilise en général de l'oxygène, livré sous forme liquide. L'ozone est un gaz très irritant. Pour protéger le personnel d'exploitation, il faut veiller à ce qu'il ne soit pas libéré au cours de la réaction et que l'ozone résiduel soit détruit dans l'effluent gazeux..

L'ozone doit être fabriqué sur place

Fig. 10 > Schéma classique d'une installation d'ozonation

De l'ozone gazeux, produit sur place dans un générateur d'ozone, est injecté dans les eaux usées. Le bassin d'ozonation doit être assez grand pour que l'ozone réagisse avec les composants des eaux usées. Les eaux subissent ensuite un traitement biologique, qui sert à éliminer les produits de l'oxydation. L'effluent gazeux contenant de l'ozone doit être aspiré et l'ozone résiduel détruit.



L'ozonation s'intègre en général bien dans une STEP existante et le personnel d'exploitation est à même, moyennant une formation adéquate, d'appliquer ce procédé. L'installation d'une ozonation (sans traitement ultérieur) augmente la consommation énergétique d'environ 0,05 à 0,1 kWh/m³, tandis que les coûts augmentent de 0,05 à 0,15 fr./m³ environ. Ces chiffres dépendent de conditions spécifiques telles que la taille de l'installation, la composition des eaux usées, l'infrastructure existante, etc. La hausse représente donc environ 10 à 30 % pour ce qui est de la consommation énergétique et 10 à 20 % pour les coûts.

Hausse de la consommation énergétique et des coûts

Au cours des essais pilotes, l'ozonation a éliminé en grande partie une vaste palette de substances. Le taux d'élimination dépend avant tout du dosage de l'ozone. Avec une dose de 3 à 5 g O₃ par m³ d'eaux usées traitées, on a atteint un taux moyen d'élimination supérieur à 80 %. Cette dose est également parvenue à réduire encore la toxicité (activité œstrogénique, toxicité pour les algues, les poissons, etc.) des eaux traitées pour les organismes aquatiques sensibles. Les craintes selon lesquelles la transformation des substances donnerait naissance à des sous-produits problématiques se sont révélées infondées. On a parfois certes observé une hausse de la toxicité à la sortie de l'ozonation, mais elle avait de nouveau diminué après le filtre à sable subséquent. Pour éliminer d'éventuels produits réactifs de l'oxydation à la STEP et éviter tout apport d'ozone dissous, il est recommandé de faire suivre l'ozonation d'une étape de traitement biologique. L'ozonation a pour autres effets positifs de désinfecter et de décolorer l'eau.

Large élimination des micropolluants et abaissement de la toxicité

4.4

Charbon actif: CAP et CAG

Les essais réalisés à grande échelle ont montré que le recours au charbon actif en poudre (CAP) permet d'éliminer en grande partie une vaste palette de substances des eaux usées urbaines et qu'il diminue nettement la toxicité des eaux usées pour les organismes aquatiques. Un traitement au CAP s'intègre en général bien dans une

Le CAP convient pour éliminer les micropolluants

station d'épuration existante. On ne possède pour l'heure que peu de connaissances sur l'utilisation du charbon actif en grains (CAG) pour éliminer les micropolluants.

Le charbon actif présente une structure très poreuse et possède dès lors une grande surface spécifique ($> 1000 \text{ m}^2/\text{g}$). Nombre de substances s'y fixent en raison de leurs propriétés physico-chimiques. Les applications du charbon actif sont multiples et variées. On l'utilise ainsi dans la production d'eau potable, le traitement d'eaux industrielles, l'industrie alimentaire et le traitement d'effluents gazeux.

Les composés qui se fixent sur le charbon actif comprennent aussi bien les micropolluants (effet souhaité) que des substances organiques naturelles (effet indésirable). Pour piéger un maximum de micropolluants en utilisant un minimum de charbon actif, on applique en général l'adsorption sur charbon actif après un traitement biologique poussé. En ajoutant du CAP au traitement biologique, il en faudra des quantités nettement plus grandes.

Le charbon actif peut être ajouté aux eaux usées sous deux formes. Les fig. 11 et fig. 12 présentent les schémas des installations typiques correspondantes:

- > *Charbon actif en grains (CAG)*: Le charbon actif en grains possède une granulométrie de l'ordre de quelques millimètres et est utilisé dans des lits filtrants fixes (filtres). Les substances se fixent à la surface du charbon. Lorsque celui-ci arrive à saturation, il est enlevé, retraité et peut (moyennant des pertes) être réutilisé.
- > *Charbon actif en poudre (CAP)*: Le CAP est du charbon actif moulu très fin, sa granulométrie est de l'ordre de quelques micromètres. Le CAP doit être mélangé aux eaux usées, puis séparé et, enfin, éliminé. Le retraiter n'est pas rentable. Pour mettre en oeuvre le CAP, on peut recourir à diverses possibilités techniques, qui se distinguent par le mode d'extraction du charbon des eaux usées.

Les substances se fixent à la surface du charbon actif

Adsorption sur charbon actif après l'épuration biologique

Le CAG est utilisé dans des filtres

Le CAP est mélangé aux eaux usées, pour être séparé ensuite

Fig. 11 > Schéma du traitement au charbon actif en grains

Le filtre au CAG est placé après la décantation finale, voire après un préfiltre. Le CAG doit être changé régulièrement.

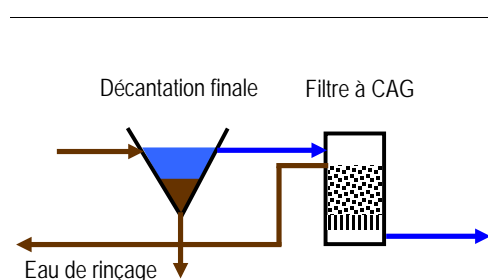
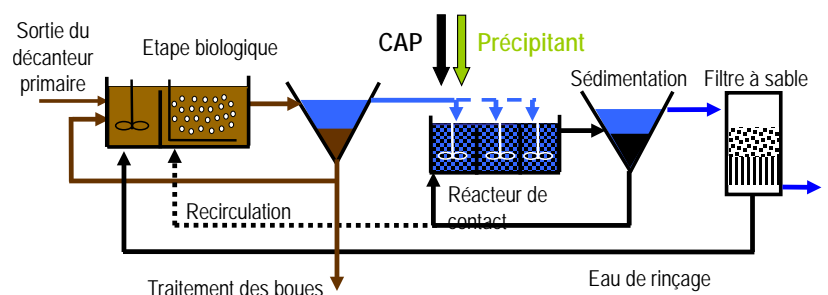


Fig. 12 > Schéma du traitement au charbon actif en poudre

Schéma d'une installation typique utilisant du CAP. Le CAP est ajouté aux eaux après le traitement biologique, puis séparé et réintroduit dans le système. L'excédent retourne à l'étape biologique. Un filtre à sable sert à retenir la fraction fine.



On ne possède pour l'heure que de rares connaissances sur l'utilisation du CAG afin d'éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Un filtre à CAG peut en principe bien s'intégrer dans une exploitation et le CAG convient bien pour éliminer une vaste palette de substances. On en sait toutefois encore peu sur la durée de vie des filtres, c'est-à-dire sur le temps au bout duquel le contenu du filtre arrive à saturation et doit être échangé. Des expériences pratiques devront être menées à cet effet. Si la durée de vie est trop courte, le rapport coût-utilité sera défavorable.

CAG: la durée de vie des filtres n'étant pas connue, on ignore les coûts

Les essais pilotes et les expériences engrangées à l'étranger montrent qu'il est possible de bien intégrer une étape de traitement au CAP dans une STEP existante. Le recours au charbon actif n'engendre qu'une hausse minime de la consommation énergétique d'une STEP (0,01 à 0,04 kWh/m³), car l'essentiel de l'énergie est utilisé à l'extérieur, pour produire du charbon actif (env. 3 à 5 kg de charbon pour 1 kg de charbon actif). En fonction du procédé appliqué, de la taille de l'installation, de la composition des eaux usées et des conditions locales, les coûts augmentent de 0,1 à 0,25 fr./m³. Le CAP entraîne différentes conséquences pour le fonctionnement d'une STEP: la production de boues augmente de 5 à 10 % et la recirculation du charbon dans les éléments existants de l'installation peut accroître l'effet abrasif et corrosif. Après utilisation, le charbon actif en poudre doit être incinéré (avec les boues d'épuration ou après un traitement séparé).

Le CAP convient bien pour une utilisation dans les STEP communales

Le CAP élimine en grande partie une vaste palette de produits des eaux usées urbaines. Le taux d'élimination dépend en particulier des propriétés du charbon utilisé et du dosage. Avec une dose de 12 à 15 g CAP/m³ d'eaux usées traitées, on a obtenu un taux moyen d'élimination supérieur à 80 %. De même, ce dosage a supprimé la plupart des effets néfastes (telles l'activité œstrogénique et la toxicité pour les algues et les poissons) sur les organismes aquatiques sensibles. La teneur des eaux en substances organiques (teneur en COD ou DCO) a en outre diminué de 30 à 50 % et l'eau a été décolorée.

Large élimination des micropolluants et diminution de la toxicité

4.5

Membranes denses

La nanofiltration et l'osmose inverse sont à même de retenir la quasi-totalité d'une vaste palette de substances. Ces procédés ne se prêtent toutefois pas à une application dans les STEP communales, car il reste à élaborer des solutions pour traiter et éliminer les micropolluants ainsi retenus. De plus, leur coût est nettement plus élevé que pour l'ozonation ou l'adsorption sur CAP.

Les membranes denses ne se prêtent pas à une utilisation dans les STEP communales en Suisse

Par procédés utilisant des membranes denses, on entend la nanofiltration et l'osmose inverse. Voici leur mode de fonctionnement: de l'eau sous haute pression (> 2 bars) est propulsée à travers une membrane qui retient les substances dissoutes et non dissoutes, soit en les rejetant soit en les absorbant. Les deux procédés sont appliqués dans la production d'eau potable (p.ex. en cas de contamination par des pesticides) et le traitement d'eaux industrielles, l'osmose inverse intervenant avant tout dans le dessalement d'eau de mer et la production d'eau ultrapure.

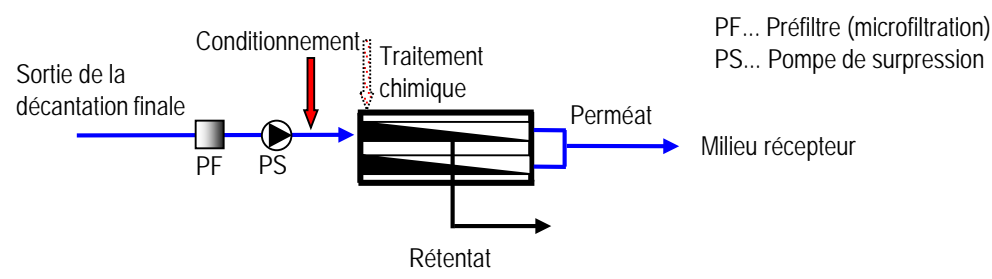
Membranes denses: la nanofiltration et l'osmose inverse retiennent les substances par la finesse de leur porosité

Pour pouvoir traiter des eaux usées communales à l'aide de membranes denses, une épuration préalable est indispensable, car il importe notamment de protéger les membranes contre les matières en suspension (formation de dépôts et colmatage). La filtration membranaire engendre toujours deux flux d'eau: d'une part, les eaux traitées «propres» (perméat); d'autre part, le concentrat ou rétentat, qui contient les substances séparées et peut représenter jusqu'à 25 % du flux initial. Ce concentrat doit à son tour subir un traitement ou être éliminé. La fig. 13 illustre le fonctionnement de la nanofiltration.

Deux produits: de l'eau propre et un rétentat

Fig. 13 > Exemple de fonctionnement d'une installation de nanofiltration

Les eaux traitées doivent être préfiltrées (ultrafiltration) à la sortie de la décantation finale. Elles sont ensuite mises sous pression (en général > 2 bars), puis propulsées à travers la membrane. Afin d'accroître la vitesse, on fait tourner les eaux plusieurs fois en boucle. Le rétentat obtenu doit subir un traitement ou être éliminé.



Comme les expériences recourant à la nanofiltration et à l'osmose inverse pour traiter les eaux usées urbaines font largement défaut, on ne dispose guère de données fiables sur la consommation énergétique et le coût de ces procédés. On peut supposer que la consommation énergétique avoisine actuellement 1 kWh/m³, tandis que les coûts sont estimés à au moins 0,6 fr./m³ (valeurs de la production d'eau potable).

Manque d'information sur l'application aux eaux usées; consommation d'énergie et coûts élevés

Si l'on peut certes envisager de recourir aux membranes denses pour éliminer les micropolluants et les germes des eaux usées urbaines, les grandes quantités d'énergie requises et la nécessité de traiter le concentrat obtenu – problème qui reste encore irrésolu – conduisent toutefois à rejeter cette solution. Ce procédé devrait pourtant être pris en considération dans des cas particuliers, par exemple pour traiter des eaux industrielles ou réutiliser des eaux traitées.

Le problème de l'élimination du concentrat n'est pas résolu

4.6 Oxydation avancée

Les systèmes d'oxydation avancée (*advanced oxidation processes*, AOP) sont en principe à même d'éliminer une vaste palette de micropolluants des eaux usées. Leur utilisation n'est toutefois pas appropriée dans les STEP communales: d'une part, on ne sait pratiquement rien sur leur application aux eaux usées urbaines dans la pratique; d'autre part, leur consommation énergétique et leurs coûts sont nettement plus élevés que ceux de l'ozonation ou du traitement au charbon actif.

L'oxydation avancée ne se prête pas à une utilisation dans les STEP communales

L'oxydation avancée repose sur l'oxydation de composés organiques par des radicaux hydroxyles (OH). Impossibles à entreposer, ces radicaux doivent être produits sur place (dans l'eau) et sont extrêmement réactifs: ils réagissent pratiquement avec toutes les substances organiques, donc non seulement avec les micropolluants, mais aussi avec la charge de fond de COD, ainsi qu'avec quelques composés inorganiques. Comme dans le cas de l'ozonation, les substances oxydées ne sont en principe pas minéralisées (elles ne se transforment pas jusqu'à devenir du CO_2), mais partiellement transformées, les produits de la réaction demeurant inconnus. Les systèmes d'oxydation avancée sont aujourd'hui le plus souvent utilisés pour traiter des eaux industrielles.

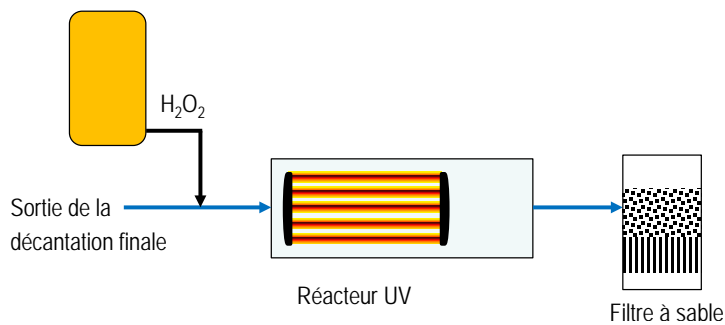
Oxydation par des radicaux hydroxyles

Il existe divers types d'activation de l'oxydant primaire pour obtenir des radicaux HO: $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, TiO_2/UV (ou un autre semi-conducteur), $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, système de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe(II)}$), etc. Les radicaux étant très réactifs, les eaux usées doivent subir une bonne épuration préalable, pour qu'ils réagissent au mieux avec les micropolluants. La fig. 14 montre le schéma d'une installation plausible recourant à un système photochimique ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$).

Divers systèmes permettent de produire des radicaux hydroxyles

Fig. 14 > Schéma d'une installation d'oxydation avancée utilisant les UV et du H_2O_2

Dans le procédé illustré ici, on ajoute de l'eau oxygénée (peroxyde d'oxygène, H_2O_2) dans l'eau. Sous l'effet du rayonnement UV, l'eau oxygénée se transforme en radicaux hydroxyles ($\text{OH}\cdot$). Comme dans le cas de l'ozonation, cette étape devrait être suivie par un traitement biologique afin de dégrader les produits de l'oxydation.



Les radicaux hydroxyles (OH) réagissent avec pratiquement tous les composants des eaux usées, leur efficacité est donc relativement limitée. On admet en principe que plus on augmente la concentration de radicaux, meilleur sera le taux d'élimination des micropolluants. Ce procédé consomme toutefois nettement plus d'énergie que l'ozonation pour éliminer les composés traces organiques des eaux usées urbaines et il est également plus coûteux.

Procédé mal connu, consommation énergétique et coûts relativement élevés

L'élimination de micropolluants a été testée en laboratoire à l'étranger. Ces essais ont confirmé que le procédé peut éliminer l'essentiel d'un grand nombre de substances. Les produits de la transformation et les effets de la toxicité (et de l'écotoxicité) des eaux traitées n'ont cependant pas encore été suffisamment étudiés.

L'oxydation avancée élimine une grande partie des micropolluants

Pour des raisons économiques, les systèmes d'oxydation avancée ne conviennent pas pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. On pourrait éventuellement associer l'ozonation et le recours au peroxyde d'oxygène afin d'éliminer des substances particulièrement persistantes présentes dans des eaux usées contenant des eaux industrielles. Une telle association permettrait de créer davantage de radicaux hydroxyles et d'éliminer ainsi les composés capables de résister à l'ozone.

L'oxydation avancée pourrait servir à traiter des eaux usées contenant des eaux industrielles

4.7 Autres procédés

4.7.1 Procédés par adsorption

Selon l'objectif poursuivi, on peut recourir aux adsorbants les plus variés pour traiter l'eau ou les eaux usées. Mentionnons par exemple les zéolithes, présents dans beaucoup de détergents et servant à adoucir l'eau, ou les résines adsorbantes, que l'on utilise en général de manière ciblée afin de fixer des substances précises. Des résultats récents indiquent ainsi que ces résines permettent d'éliminer tout un éventail de pesticides des eaux pluviales (Burkhardt 2011). Jusqu'ici, outre le charbon actif, on n'a encore trouvé aucun adsorbant à même d'éliminer une vaste palette de substances des eaux usées urbaines.

Aucun adsorbant approprié n'a été identifié jusqu'ici

4.7.2 Procédés biologiques (supplémentaires)

Les procédés biologiques supplémentaires désignent des étapes qui interviennent après le traitement biologique ordinaire des eaux usées et qui impliquent une activité biologique. En voici des exemples: filtre à sable, sol filtrant, lagunage (étang d'affinage), systèmes d'épuration végétale (marais artificiel), etc. Ils associent le plus souvent plusieurs procédés, mais la dégradation biologique joue dans la plupart des cas un rôle prépondérant pour les substances dissoutes. Ces systèmes peuvent aussi avoir un effet filtrant et retenir des substances solides, donner lieu à des processus de sorption ou à des transformations sous l'effet du rayonnement solaire.

L'élimination intervient surtout par dégradation biologique

On distingue entre procédés naturels (lagunage et épuration végétale, p. ex.), qui consomment certes peu d'énergie mais occupent beaucoup de place, et procédés techniques (filtre à sable, p. ex.), qui consomment davantage d'énergie mais se contentent d'une place assez restreinte.

Procédés naturels et techniques

Comme ces procédés reposent pour l'essentiel sur la dégradation biologique, l'élimination supplémentaire de micropolluants obtenue après l'épuration biologique habituelle des eaux est dans l'ensemble minime, même si l'on obtient parfois une nette réduction de certaines substances. N'ayant pas de large spectre d'action, les procédés biologiques supplémentaires ne conviennent pas pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines.

Absence d'un large spectre d'action

Les procédés biologiques englobent aussi la bioaugmentation. Celle-ci consiste à ajouter aux eaux usées des micro-organismes qui sont à même de dégrader certains

Bioaugmentation: adjonction de micro-organismes spécifiques

composés. Ce procédé est très prometteur pour éliminer des substances spécifiques, mais son spectre d'action est restreint.

4.7.3 Précipitation/floculation

L'adjonction de précipitants ou de floculants, tels le fer, l'aluminium ou des polyélectrolytes, crée des surfaces sur lesquelles les micropolluants peuvent être adsorbés. Dans la plupart des STEP suisses, on utilise aujourd'hui des précipitants à base de fer pour éliminer les phosphates. Le recours à des précipitants ou à des floculants n'engendre pas une élimination significative de micropolluants (Sterkele et Gujet 2009).

Les précipitants sont aujourd'hui couramment utilisés; ils n'ont guère d'effet sur les micropolluants

4.7.4 Nanotechnologies

On étudie aujourd'hui intensivement des procédés permettant d'éliminer les micropolluants à l'aide de nanoparticules. Ils se fondent en général sur l'adjonction de nanoparticules qui réagissent directement avec les micropolluants (adsorption, oxydation, etc.) ou qui dégagent, en raison d'un prétraitement spécial, des substances qui réagissent, elles, avec les micropolluants (p. ex. Corvini et Shahgaldian 2010).

Nanoparticules: efficacité potentielle, absence d'expériences pratiques

4.7.5 Oxydation

Outre l'ozone et les radicaux hydroxyles, il existe aussi d'autres oxydants, dont le ferrate et le chlore.

> *Ferrate*: Le ferrate est du fer hexavalent, dont la capacité à traiter les eaux usées n'a été découverte que récemment. A l'instar de l'ozone, le ferrate réagit de manière sélective avec certains composés chimiques (groupes fonctionnels). L'élimination des micropolluants dépend du dosage. L'avantage du ferrate, c'est que la réaction le transforme en fer trivalent, auquel on recourt pour précipiter le phosphate. L'utilisation du ferrate n'a jusqu'ici été testée qu'en laboratoire, mais les essais s'avèrent prometteurs. Sa réactivité chimique est légèrement inférieure à celle de l'ozone. Des études s'imposent encore afin de déterminer plus précisément son efficacité et sa rentabilité.

Ferrate: un procédé découvert récemment et au potentiel remarquable

> *Chlore/dioxyde de chlore*: Le chlore et le dioxyde de chlore sont principalement utilisés comme désinfectants dans le conditionnement de l'eau potable. Le chlore est un oxydant puissant qui réagit avec certains composés chimiques. On a pu démontrer qu'il ne possède pas un large spectre d'action, c'est-à-dire qu'il ne peut éliminer qu'une petite palette de substances. De plus, ce procédé requiert de grandes quantités de chlore (davantage que pour la désinfection) et engendre, à cause de la forte teneur des eaux usées en substances organiques, des sous-produits problématiques comme les AOX (des trihalométhanes, p. ex.) en quantités relativement grandes. Le chlore ne convient donc pas pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines.

Chlore: provoquant l'apparition de sous-produits, son utilisation dans les eaux usées pose problème

4.7.6 Photolyse

La photolyse consiste à soumettre les eaux usées à un rayonnement UV, fourni soit par la lumière solaire naturelle soit par une source artificielle. Largement utilisé pour désinfecter l'eau potable et les eaux usées, ce procédé ne convient toutefois pas pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Il ne parvient en effet à détruire que des substances assez peu nombreuses, tels le diclofénac ou l'iopromide (Kim et al. 2009, McArdell et al. 2011). Il ne possède donc pas le large spectre d'action requis.

Rayonnement UV: absence d'un large spectre d'action

4.7.7 Ultrasons

Appliqués aux eaux usées, les ultrasons forment des microbulles très fines et à durée de vie très brève, qui libèrent localement de grandes quantités d'énergie. Celle-ci engendre une multitude de processus, comme la pyrolyse ou la formation de radicaux O⁻ et HO[•]. Si ces réactions peuvent certes oxyder les micropolluants, les premiers essais en laboratoire n'ont pas encore abouti à des taux d'élimination suffisants (Naddeo et al. 2009). Ce procédé doit encore faire l'objet d'études approfondies.

Ultrasons: d'autres recherches s'imposent

4.8 Constat

- > Le conditionnement de l'eau potable et le traitement des eaux usées font appel à une foule de procédés pour éliminer les composants les plus variés. Certains de ces procédés sont à même d'éliminer une large palette de micropolluants des eaux usées urbaines. S'il est dépourvu de ce large spectre d'action, un procédé est en général considéré comme inapproprié.
- > Selon les connaissances actuelles, ce sont l'ozonation et le traitement au charbon actif qui conviennent le mieux pour éliminer une large partie des micropolluants et il est possible de les intégrer dans les installations existantes. Soulignons cependant que l'on ne connaît aucun procédé qui soit à même d'éliminer complètement tous les micropolluants à un coût abordable.
- > Des essais pilotes ont montré que tant le traitement au charbon actif que l'ozonation conviennent pour éliminer l'essentiel d'un grand nombre de micropolluants des eaux usées. On a par ailleurs prouvé que ces procédés atténuent les effets néfastes de ces substances sur les organismes aquatiques (activité hormonale, p.ex.) et que les truites arc-en-ciel, par exemple, peuvent à nouveau mieux se développer.
- > Pour ce qui est des autres procédés, comme le charbon actif en grains, les membranes denses, l'oxydation avancée, etc., on ne dispose pas encore de connaissances suffisantes pour évaluer leur pertinence avec la fiabilité requise, ou alors des raisons économiques, techniques ou relevant de l'exploitation s'opposent encore à leur application. Les connaissances scientifiques et les progrès techniques ne cessant d'évoluer, on découvrira certainement d'autres procédés qui seront à même d'éliminer les micropolluants.

Il existe une foule de procédés techniques

L'ozonation et le charbon actif sont d'actualité

Effet positif sur la qualité de l'eau

Autres procédés: manque de connaissances ou efficacité insuffisante

5 > Coût et utilité des procédés supplémentaires d'épuration

L'installation d'étapes de traitement supplémentaires dans les STEP communales est à même d'accroître la qualité de l'eau des rivières en Suisse. Elle engendrerait néanmoins une hausse de la consommation énergétique et des coûts de l'épuration des eaux. L'équipement ciblé de certaines STEP judicieusement sélectionnées vise à améliorer la protection des eaux à un coût abordable..

5.1 Objectifs, train de mesures et cadre international

Dans les chapitres 2 à 4, nous avons démontré que c'est par le biais des effluents de STEP communales que la majeure partie des micropolluants parviennent dans les eaux, où ils peuvent poser problème. Etendre la filière de traitement des STEP en lui ajoutant une étape supplémentaire permet de réduire nettement l'apport de polluants. Cette optimisation vise trois objectifs prioritaires (p. ex. DETEC 2009):

Objectifs: diminuer la charge polluante, sauvegarder les écosystèmes et protéger les ressources en eau potable

- > *Diminuer la charge polluante:* Véritable château d'eau de l'Europe, la Suisse exporte toutes ses eaux usées vers les pays voisins dans les grands cours d'eau (tels le Rhin et le Rhône). Or ces fleuves sont exploités pour produire de l'eau potable et irriguer les terres agricoles. En Suisse, on accorde dès lors une grande importance à la protection des eaux. Au nom de sa responsabilité de riverain d'amont, la Suisse peut entreprendre des actions ciblées pour réduire la charge totale de micropolluants.
- > *Sauvegarder les écosystèmes:* C'est dans les cours d'eau qui charrient une grande proportion d'eaux traitées que l'on observe les plus fortes concentrations de micropolluants. Une optimisation des STEP situées sur ces cours d'eau permettra d'améliorer la qualité de l'eau et d'éviter dans une large mesure les atteintes néfastes aux organismes aquatiques sensibles.
- > *Protéger les ressources en eau potable:* On a par ailleurs détecté des composés traces organiques dans les captages d'eau potable à proximité de cours d'eau (filtrat de rive) et dans les lacs servant de source d'eau potable (Blüm et al. 2005). Réduire l'apport de micropolluants améliorera également la qualité des eaux brutes.

D'autres pays et des organisations internationales poursuivent les mêmes objectifs. En Allemagne, le land de Bade-Wurtemberg a déjà équipé quelques STEP d'une étape de traitement supplémentaire afin de prévenir une pollution de la réserve d'eau potable que constitue le lac de Constance et d'améliorer la qualité de cours d'eau de surface pollués (MUNV 2010). Le land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie consent lui aussi des efforts pour réduire l'apport de micropolluants dans les eaux contaminées. A cet effet, il a mené de vastes recherches et appliqué diverses mesures (p. ex. Pinnekamp et al. 2008, ISA 2011). La Commission internationale pour la protection du Rhin (CIPR) se

Un problème reconnu à au niveau international

penche également sur le problème: à partir de rapports d'évaluation portant sur divers groupes de substances, elle élabore actuellement une stratégie sur les micropolluants (CIPR 2010a,b, CIPR 2011a,b). En période d'étiage, la proportion des eaux usées dans le cours inférieur du Rhin atteint en effet jusqu'à 20 %. En optimisant les 191 plus grandes stations d'épuration situées dans le bassin versant du Rhin (6 % des STEP), il serait possible de réduire de 30 à 50 % les charges de micropolluants provenant des eaux usées urbaines (CIPR 2010a).

La Suisse prévoit de doter environ 100 STEP, sur plus de 700, d'une étape supplémentaire d'épuration au cours des 15 à 25 années à venir. Selon les estimations actuelles, elle pourra ainsi atteindre les objectifs ci-dessus, car ce projet pourrait réduire de 50 % la charge totale de micropolluants. La sélection des STEP à optimiser devra résulter d'une planification à long terme par bassin versant. Relevons néanmoins que ce sont les STEP moyennes à grandes qui sont les mieux à même d'être équipées. Pour les petites STEP, il faudra envisager d'autres solutions (comme le raccordement à des STEP plus grandes).

L'optimisation des STEP influe sur les eaux, le bilan énergétique et les coûts. Les chapitres ci-après présentent ces diverses conséquences plus en détail.

Train de mesures: équiper
100 STEP d'une étape de traitement supplémentaire

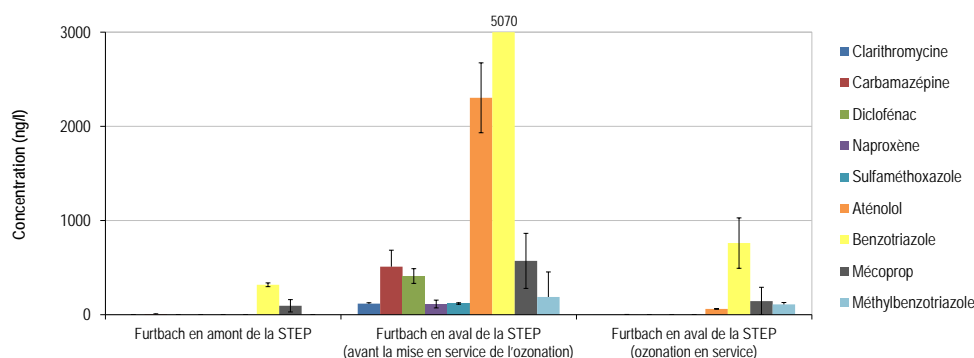
5.2 **Eaux**

5.2.1 **Conséquences locales**

Dans le cadre de l'essai pilote mené à la STEP de Regensdorf, on a analysé les conséquences de l'ozonation sur le milieu récepteur, le Furtbach. En aval de la STEP, les eaux traitées représentent environ 50 % du débit du ruisseau, soit une proportion considérable. Avant la mise en service de l'ozonation, les concentrations de certains composés traces augmentaient donc nettement en aval du point de déversement de la STEP (fig. 15).

Fig. 15 > Comparaison de la qualité des eaux du Furtbach en amont et en aval de la STEP, avant et après la mise en service de l'ozonation

Le graphique illustre les moyennes des concentrations relevées durant deux campagnes de mesure en juin 2007 (avant la mise en service de l'ozonation) et de trois campagnes en mai 2008 (l'ozonation étant en service, avec un dosage de $0,62 \pm 0,05$ g O₃/g COD).



Données: Eawag (Hollender et al. 2009)

L'ozonation a nettement diminué la charge de polluants dans le Furtbach. Sur l'année, l'ajout d'une dose moyenne d'ozone aurait pour effet de diminuer comme suit les charges de micropolluants: 1,1 kg de carbamazépine (100 %), 2,4 kg de diclofénac (100 %) et 7,5 kg de benzotriazole (65 %). De vastes observations menées sur les eaux épurées ont révélé que la diminution de la pollution réduit aussi sensiblement les effets indésirables. On a ainsi réalisé des tests en plongeant dans le cours d'eau des cages contenant des gammarès, qui jouent un rôle clé pour la décomposition du matériel organique dans l'écosystème aquatique. Avant la mise en service de l'ozonation, la voracité des crustacés diminuait en aval de la STEP. Lorsque l'ozonation était en service, leur voracité était la même en amont et en aval de la STEP (Bundschuh et al. 2011).

Nette diminution de la charge polluante

Des substances présentes dans les eaux usées qui portent atteinte à des organismes isolés peuvent en fin de compte modifier les peuplements et la fréquence de certaines espèces sensibles. Après la mise en service de l'ozonation, des espèces sensibles étaient nettement plus présentes dans le cours d'eau en aval de la STEP qu'auparavant (Ashauer et al., soumis pour publication). Les données ont ici été évaluées à l'aide de l'indice du système SPEAR (Species At Risk) pour les pesticides, qui a été spéciale-

Les espèces sensibles plus présentes

ment élaboré afin d'identifier la charge de pesticides et qui détermine la proportion d'espèces sensibles dans la biocénose.

L'essai pilote n'a guère exercé d'influence sur la population piscicole, celle-ci se composant toutefois surtout d'espèces peu sensibles (loches et chevaines). Les espèces sensibles, tels les salmonidés, réagissent en général plus violemment à un changement de la qualité de l'eau (p.ex. Bukhardt-Holm 2005, PNR50 2008). Dans les cours d'eau charriant une grande proportion d'eaux traitées, on a parfois mesuré des valeurs accrues de vitellogénine (symptôme d'une «féminisation») chez les truites mâles en aval de STEP (Vermeirssen et al. 2005). Ces valeurs sont à mettre sur le compte de l'apport de substances à activité œstrogénique avec les eaux traitées. Dans le cadre des essais pilotes de Regensdorf et de Lausanne, des truites soumises au flux d'eau épurées par un traitement biologique affichaient des valeurs de vitellogénine significativement plus élevées. Après ozonation ou traitement au charbon actif, ces valeurs ont sensiblement diminué pour retrouver le niveau de référence (Kienle et al. 2011), Margot et al. 2011).

La «féminisation» des poissons mâles est atténuée

Les études pilotes réalisées avaient été élaborées et approuvées par un comité international d'experts. Voici leurs principaux résultats:

- > L'ozonation et le traitement au charbon actif éliminent à plus de 80 % une large palette de micropolluants, de même que leurs effets.
- > Aucun accroissement de la toxicité n'a été observé en raison de la formation de sous-produits ou de produits de transformation toxiques sous l'effet de l'ozonation.
- > Il convient de faire suivre l'ozonation d'une étape de traitement biologique, afin de réduire le risque de déversement de sous-produits ou de produits de transformation dans les eaux.
- > L'étape de traitement supplémentaire augmente significativement la qualité des eaux traitées et améliore dès lors nettement la qualité des eaux de surface.
- > Les objectifs définis, à savoir sauvegarder les écosystèmes et protéger les ressources en eau potable, ont été atteints.

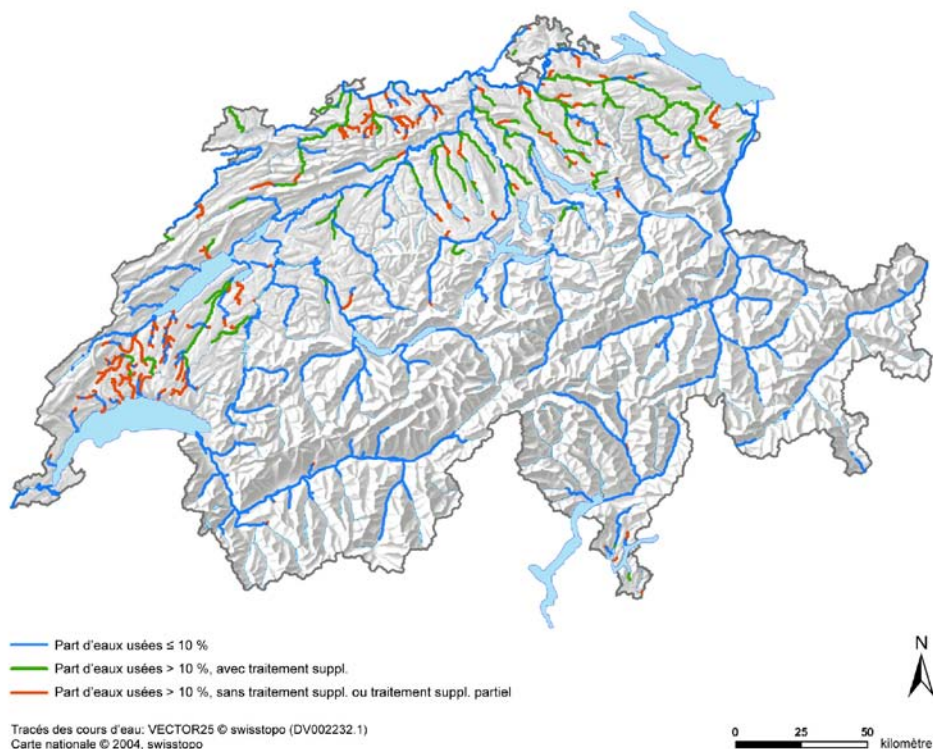
5.2.2 Conséquences à l'échelle nationale

En Suisse, la qualité de l'eau est dans l'ensemble très bonne. Elle pose surtout problème dans les cours d'eau qui charrient beaucoup d'eaux usées traitées (dilution < 1:10 ou proportion d'eaux traitées > 10 % (PNR50 2008)). Mis bout à bout, les tronçons concernés totalisent 1400 km. En équipant environ 100 STEP sélectionnées d'une étape de traitement supplémentaire, on pourra réduire de moitié environ la charge de micropolluants et dès lors améliorer nettement la qualité de l'eau (cf. fig. 16, ainsi que fig. 4). A long terme, ce traitement supplémentaire aura une influence positive sur le peuplement d'espèces sensibles, comme la truite de rivière.

Améliorer la qualité de l'eau en diminuant la charge polluante

Fig. 16 > Amélioration de la qualité de l'eau dans les tronçons où la proportion d'eaux traitées est élevée

La situation illustrée ici se fonde sur un scénario qui consiste à équiper d'une étape de traitement supplémentaire les STEP de plus de 80 000 habitants raccordés (hab.), les STEP de plus de 24 000 hab. sises dans le bassin versant d'un lac, les STEP de plus de 8000 hab. sises sur des cours d'eau où la part d'eaux traitées dépasse 10 % et certaines STEP (de 1000 à 8000 hab.) situées sur des cours d'eau où la part d'eaux traitées dépasse 10 % et où les eaux traitées déterminent la qualité de l'eau sur un tronçon de 10 km au moins.



Les truites de rivière préfèrent les eaux fraîches, à courant rapide et riches en oxygène (Gerstmeier et Romig 1998). On les rencontre pratiquement dans toute la Suisse, leur distribution étant également favorisée par le lâcher de juvéniles (OFEV 2011). Pour ce qui est de la température de l'eau, la truite de rivière dispose aujourd'hui d'habitats très vastes. Si la température continue toutefois d'augmenter, sous l'effet du changement climatique, ces habitats tendront à rétrécir dans les cours d'eau de plaine qui irriguent le Plateau et le sud du Tessin. Or c'est plus spécialement dans ces cours d'eau que la charge d'eaux usées urbaines est élevée (Keusen et al. 2010). Avec une aggravation des sécheresses, les périodes d'étiage vont se prolonger, de sorte que les eaux traitées seront moins diluées et que les concentrations de micropolluants vont s'accroître. Ces facteurs se cumulant, l'amélioration de l'un d'entre eux, comme la qualité des eaux usées traitées, peut avoir un effet positif sur la population de truites.

Les truites de rivières subissent l'effet de divers facteurs

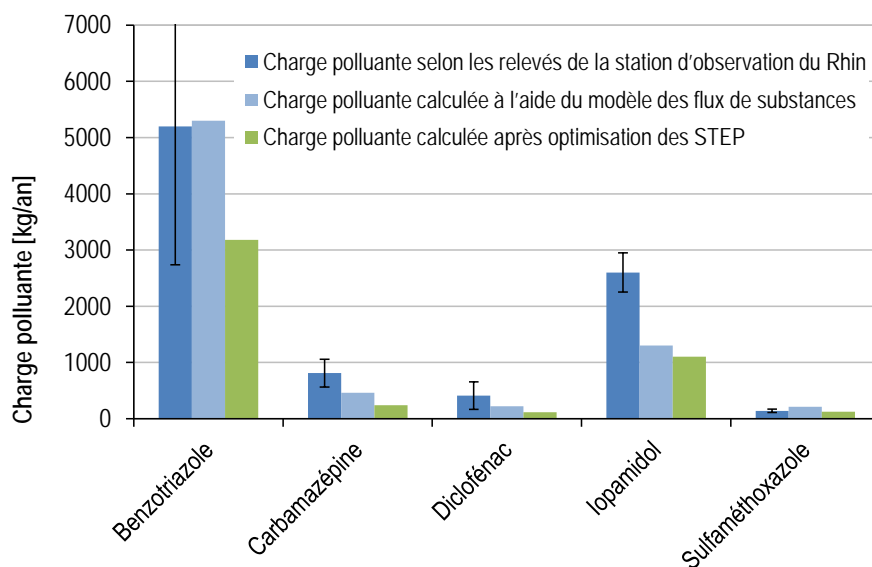
L'installation d'une étape supplémentaire de traitement dans les STEP moyennes à grandes permettra par ailleurs de réduire la charge polluante globale et de protéger ainsi les ressources en eau potable. Environ deux tiers des eaux usées suisses se déversent par exemple dans le Rhin, qui fournit de l'eau potable à 20 millions de personnes réparties entre la Suisse, l'Allemagne, la France et les Pays-Bas (CIPR 2011c). Or des études ont montré que les concentrations de certaines substances tendent à augmenter au fil de l'eau (TZW 2006).

Protection des ressources en eau potable

Des modélisations révèlent l'effet de mesures prises dans une centaine de STEP sur quelques micropolluants mesurés dans le Rhin à la hauteur de Bâle (fig. 17).

Fig. 17 > Charges de quelques micropolluants dans le Rhin à la hauteur de Bâle

Comparaison des charges mesurées sur place, des charges calculées à l'aide du modèle des flux de substances et des charges après application des mesures prévues. On a admis que 100 STEP environ seraient optimisées, de sorte que 50 % des eaux usées subiraient un traitement supplémentaire (réduction maximale de la charge: 50 %).



Données: station internationale d'observation du Rhin près de Bâle (Singer et al. 2009)

Les mesures appliquées dans les STEP réduisent nettement les flux de substances dont l'apport est principalement dû aux STEP (charge mesurée \approx charge modélisée) et qui réagissent bien à un traitement supplémentaire (carbamazépine, diclofénac ou sulfaméthoxazole). Lorsque le taux d'élimination d'une substance qui ne parvient dans les eaux que par le biais d'une STEP est de 100 %, sa charge dans le Rhin à la hauteur de Bâle diminuera de 50 % selon l'hypothèse admise (traitement supplémentaire de la moitié des eaux épurées déversées dans le fleuve). L'effet s'avère moins frappant dans le cas de l'iopamidol (contrastant iodé utilisé en radiologie), car tant l'ozone que le charbon actif peinent à éliminer cette substance.

Diminution des charges polluantes

5.3 **Energie**

5.3.1 **Conséquences locales**

La consommation moyenne d'électricité des STEP suisses avoisine 0,33 kWh/m³ (pour un débit de temps sec), soit 41 kWh/EH/a (VSA et IC 2011). Ces chiffres ont été confirmés par une enquête réalisée auprès d'une quarantaine de grandes STEP (Abeglen et Siegrist 2010). Dans ces stations d'épuration, la consommation brute d'électricité se situait dans une fourchette allant de 0,11 kWh/m³ (beaucoup d'eaux parasites, pas de filtre) à 0,9 kWh/m³ (application de techniques spéciales).

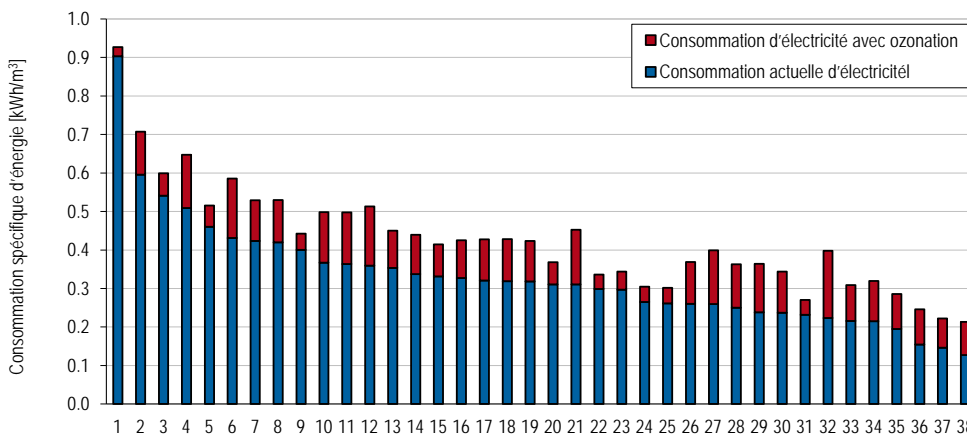
Consommation moyenne d'électricité pour l'épuration des eaux: 40 kWh/EH/a

En prenant ces quelque 40 STEP, nous avons étudié l'impact d'une étape de traitement supplémentaire sur leur consommation d'électricité (STEP uniquement). L'ozonation a servi d'exemple, car elle modifie davantage la consommation électrique qu'un traitement au CAP et qu'elle constitue dès lors le cas le plus défavorable sur le plan énergétique. Nous avons par ailleurs admis que la production d'oxygène serait centralisée (nombre restreint de sites en Suisse) et qu'elle n'interviendrait donc pas dans le bilan énergétique de la STEP. La quantité nécessaire d'ozone dépend de la composition des eaux usées (COD) et du rendement d'épuration visé (dose d'ozone). Les chiffres admis pour le courant consommé par l'ozonation se fondent sur les valeurs de l'essai pilote de Regensdorf (12,5 kWh/kg O₃) et nous avons tablé sur une dose d'ozone de 0,75 g O₃/g COD. Pour les 40 STEP considérées, ce traitement accroît la consommation d'électricité de 0,06 kWh/m³ (7,7 kWh/EH/a), la fourchette allant de 0,03 à 0,12 kWh/m³ (1,7 à 15,4 kWh/EH/a), soit une hausse de 23 % si l'on considère la consommation brute. Compte tenu du filtre à sable, qui doit suivre l'ozonation, on obtient environ 0,1 kWh/m³ (11,5 kWh/EH/a), ou 33 %. La fig. 18 illustre la consommation d'électricité actuelle et la consommation hypothétique après mise en service de l'ozonation et d'un filtre à sable.

L'ozonation accroît de 25 % environ la consommation électrique d'une STEP

Fig. 18 > Hausse de la consommation spécifique brute d'électricité engendrée par l'ozonation

Consommation actuelle d'électricité de 38 STEP suisses (en bleu) et estimation de la consommation future, après installation de l'ozonation (et d'un filtre, si encore inexistant) (en rouge).



La consommation énergétique du traitement au charbon actif en poudre est plus ou moins indépendante de la dose de CAP et du rendement d'épuration requis. Des expériences réalisées en Allemagne ont établi que la hausse de la consommation se situe entre 0,01 et 0,04 kWh/m³.

Un traitement au charbon actif en poudre accroît la consommation d'électricité de 5 % environ

Ces chiffres n'ont qu'une valeur indicative, des écarts pouvant apparaître de cas en cas selon les conditions hydrauliques ou la composition des eaux usées. Une partie de l'énergie supplémentaire nécessaire peut être compensée par une hausse de l'efficacité, des synergies ou le recours à des énergies renouvelables à la STEP (telle l'utilisation de panneaux photovoltaïques pour couvrir des bassins).

La consommation d'électricité dépend des conditions locales

5.3.2 Conséquences à l'échelle nationale

Dans le cadre du projet NEPTUNE de l'UE, on a dressé les bilans écologiques de divers procédés d'épuration des eaux usées, dont la filière conventionnelle, mais aussi d'étapes de traitement supplémentaires (Larsen et al. 2010). Si ces bilans exigent certes beaucoup de travail et sont entachés d'imprécisions, ils n'en permettent pas moins de comparer des technologies similaires. Que ce soit l'ozonation ou le recours au CAP, c'est surtout l'exploitation des installations qui domine dans l'impact sur l'environnement, l'énergie grise des ouvrages et des composants d'installation ne jouant qu'un rôle secondaire.

L'énergie grise des ouvrages ne revêt guère d'importance

La consommation électrique des STEP suisses se situe actuellement entre 450 et 510 GWh/a, soit environ 0,8 % de la consommation suisse. Le train de mesures proposé par l'OFEV prévoit d'optimiser 100 STEP afin de faire subir un traitement plus poussé à la moitié environ des eaux usées du pays (750 millions m³/a). Nous avons évalué ses conséquences sur la consommation d'électricité et d'énergie en Suisse en considérant trois scénarios (Abegglen et al. 2011):

L'épuration des eaux représente moins de 1 % de la consommation d'électricité

- > *Scénario 1*: Toutes les STEP concernées s'équipent d'un système d'ozonation et d'un filtre à sable. L'oxygène est produit de manière centralisée en Suisse.
- > *Scénario 2*: Toutes les STEP concernées s'équipent d'un traitement au CAP, avec un réacteur de contact, une sédimentation et un filtre à sable. Le charbon actif est produit à l'étranger; après usage, il fait le cas échéant l'objet d'une valorisation thermique avec les boues d'épuration.
- > *Scénario 3*: Une moitié des STEP concernées s'équipent d'un système d'ozonation et d'un filtre à sable, une autre moitié d'un traitement au CAP avec sédimentation et filtre à sable. Les hypothèses reprennent celles des scénarios 1 et 2.

Outre l'électricité supplémentaire consommée par la STEP, le scénario de l'ozonation tient compte de la production d'oxygène (l'énergie des transports ne jouant pas un grand rôle, elle a été jugée négligeable), celui du charbon actif prend en compte l'énergie requise pour fabriquer cette substance. Afin de comparer les deux procédés, nous avons déterminé leur consommation d'énergie primaire. Celle-ci considère tout le contenu énergétique d'un produit (de sa fabrication à son élimination) et permet de comparer divers agents énergétiques, comme le charbon, le gaz, le pétrole et l'électricité. Le tab. 6 indique les effets des trois scénarios sur la consommation électrique suisse ainsi que la consommation d'énergie primaire.

Peu de conséquences pour la consommation électrique suisse

Tab. 6 > Effet des étapes de traitement supplémentaires sur la consommation d'électricité et d'énergie primaire

Accroissement de la consommation suisse d'électricité et d'énergie primaire engendrée par l'optimisation de 100 STEP (traitement de 50 % des eaux usées suisses) en fonction du procédé appliqué.

		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Part des STEP avec ozonation	%	100	0	50
Part des STEP avec traitement au CAP	%	0	100	50
Consommation électrique suisse	GWh/a	70	15	40
Consommation électrique, filtre compris	GWh/a	90	35	60
Consommation d'énergie primaire	GWh/a	200	280	240
Energie primaire, filtre compris	GWh/a	260	340	300

Abegglen et al. 2011

Pour permettre d'apprécier ces chiffres, le tab. 7 fournit des données comparatives.

Tab. 7 > Consommation d'énergie: données comparatives

Hausse de la consommation d'électricité et d'énergie primaire engendrée par l'optimisation de 100 STEP et données comparatives.

	GWh/a	kWh/hab./a	Source
Electricité en Suisse: données comparatives			
Consommation électrique suisse	57 670	7700	OFEN 2010a
Consommation d'une petite ville (18 000 habitants)	133	17	Calcul
Consommation de l'épuration actuelle des eaux usées	480	56	Calcul
Consommation du traitement biologique actuel	240	28	Calcul
Traitement supplémentaire (y c. filtration)	60	8	tab. 6
Production de la centrale hydroélectrique de Rekingen (Rhin)	250	32	axpo 2011
Production de la centrale nucléaire de Gösgen	7964	1052	KKG 2010
Energie primaire: données comparatives			
Consommation suisse	320 000	41 000	OFS (2011)
Consommation liée à la mobilité	83 000	10 700	OFS (2008)
Epuration actuelle des eaux usées	1350	175	
Traitement supplémentaire (y c. filtration)	300	39	tab. 6

L'installation d'une étape de traitement supplémentaire dans les STEP accroît la consommation électrique suisse de 90 GWh/a, soit de 0,15 %, au maximum. Au niveau de l'épuration des eaux usées, la hausse ne dépasse pas 20 %. A l'échelle suisse, l'augmentation devrait plutôt avoisiner 60 Gwh/a, ou 15 %, ce qui correspond environ à la consommation électrique d'une petite ville de 10 000 habitants. Les besoins supplémentaires abaisseront néanmoins le taux d'auto-alimentation des STEP, qui devront prélever davantage d'électricité dans le réseau.

La hausse de la consommation d'électricité est de l'ordre du pour mille

Lorsque l'on considère la consommation d'énergie, il est intéressant de se pencher sur le bilan de CO₂. Les gaz ayant un impact sur le climat issus de l'épuration des eaux représentent environ 230 000 t eq CO₂/a, ou 0,5 % du total des émissions suisses (OFEV 2010). La mise en service d'une étape de traitement supplémentaire augmentera également les émissions de CO₂, l'ozonation et le traitement au CAP n'ayant cependant pas le même impact sur le climat:

Effet minime sur le bilan de CO₂

- > *Ozonation*: En Suisse, c'est surtout la hausse de la consommation d'électricité qui agit sur le bilan de CO₂, son impact dépendant du mode de production du courant. Voici le rapport entre consommation électrique et émissions de CO₂: 154 g eq CO₂/kWh (OFEV 2008). Dans le scénario 1, décrit plus haut, les émissions de CO₂ augmentent d'environ 15 000 t/a, soit environ 5 % des équivalents CO₂ de l'épuration des eaux. Relevons que, vu sa structure, le courant européen émet environ 600 g eq CO₂/kWh, de sorte que l'augmentation des émissions passe à 60 000 t/a si l'électricité supplémentaire doit être importée.
- > *Adsorption sur du CAP*: Le bilan de CO₂ du traitement au CAP est surtout influencé par la production de CAP et de la matière brute utilisée. Au pire, le charbon actif est produit à partir de lignite ou de houille. Pour produire 1 kg de charbon actif, il faut compter environ 2 à 5 kg de charbon brut (Bayer 2005, Munoz-Ortiz 2006), des chiffres plus précis n'existant pas. Tout le charbon utilisé est en fin de compte brûlé et libéré sous forme de CO₂. Si toutes les STEP concernées s'équipaient d'une étape de traitement au CAP (scénario 2), les émissions de CO₂ augmenteraient d'environ 80 000 t/a. Dans l'idéal, le charbon actif sera produit à partir de matière première renouvelable, comme le bois ou les écorces de noix de coco. Les émissions supplémentaires de CO₂ seraient nettement moindres: idéalement, elle se limiterait à quelque 6000 t/a.

5.4 Coûts

5.4.1 Conséquences locales

Les chapitres 8 et 9 présentent en détail les coûts supplémentaires engendrés par l'ozonation ou le traitement au CAP. Ces coûts dépendent de divers facteurs:

Les coûts supplémentaires dépendent de facteurs spécifiques

- > *Choix du procédé*: Les coûts d'investissement et d'exploitation de l'ozonation et du CAP ne sont pas identiques. Selon le fonctionnement du procédé, il faut s'attendre à des coûts de construction plus élevés (le traitement au CAP comprend p. ex. un réacteur de contact et une sédimentation).
- > *Composition des eaux usées*: Un même principe vaut aussi bien pour l'ozonation que pour l'adsorption sur CAP: plus le traitement préalable est efficace (épuration biologique et décantation finale), moins il faudra utiliser de matériel.
- > *Infrastructure disponible*: La possibilité d'utiliser des infrastructures existantes (bassins ou filtres désaffectés) réduit les coûts de construction. Selon le procédé retenu, il sera néanmoins nécessaire d'adapter les composants de l'installation existante (en raison de l'effet abrasif du CAP, p. ex.).
- > *Taille de l'installation*: Lorsque la taille de l'installation augmente, les coûts spécifiques diminuent.

Une étude détaillée des coûts (Hunziker-Betatech 2008) a montré que, pour des dosages de 5 mg O₃/l et de 10 mg CAP/l, le coût du capital est supérieur aux frais d'exploitation. C'est preuve qu'il est particulièrement rentable d'utiliser les infrastructures existantes.

Il vaut la peine de réutiliser les infrastructures existantes

Le tab. 8 compare, pour deux STEP de tailles différentes, les coûts de l'épuration et de l'évacuation des eaux usées ainsi que les surcoûts engendrés par une étape de traitement supplémentaire. Les expériences engrangées lors d'essais pilotes menés en Suisse et en Allemagne donnent toutefois à penser que les chiffres tendent à être inférieurs. Il apparaît néanmoins que la hausse relative des coûts est nettement plus marquée (20 à 50 %) pour les STEP plus petites, que pour les STEP plus grandes (10 à 20 %).

Hausse des coûts: entre 10 % (grandes STEP) et 50 % (petites STEP)

Tab. 8 > Coût d'une étape supplémentaire de traitement en fonction de la taille de la STEP

Une étape supplémentaire de traitement accroît de 20 à 50 % les coûts dans les petites STEP et de 10 à 20 % dans les STEP plus grandes. Les coûts comprennent l'amortissement et l'exploitation. Les montants indiqués pour l'épuration et l'évacuation des eaux usées correspondent à la moyenne de la catégorie de STEP considérée.

Procédé		Coûts annuels spécifiques			
		«Petites» STEP (14 400 EH)		Grandes STEP (590 000 EH)	
		fr./m ³	fr./EH/a	fr./m ³	fr./EH/a
Epuration des eaux		0,80	87	0,55	61
Evacuation des eaux (y c. réseau d'égouts)		1,80	198	1,25	141
Adsorption sur CAP (10 mg/l)	Sans filtre	0,25–0,3	44–53	0,1–0,15	12–18
	Avec filtre	0,42–0,47	74–84	0,15–0,2	18–24
Ozonation (5 mg/l)	Sans filtre	0,15–0,19	27–33	0,04–0,06	4,5–7
	Avec filtre	0,32–0,36	57–63	0,09–0,11	11–13

VSA et IC 2011; Hunziker-Betatech 2008

5.4.2 Conséquences à l'échelle nationale

On estime à environ 1,2 milliard de francs les coûts d'investissement pour le train de mesures décrit au chapitre 5.1. Compte tenu des coûts du capital et des frais d'exploitation, les coûts annuels avoisinent 130 millions de francs (Ecoplan et BG 2011, BG 2012). Ces montants correspondent à un coût par habitant de l'ordre de 30 francs par an si seuls les habitants raccordés aux STEP concernées assument les frais. Si les coûts sont répartis sur l'ensemble de la population suisse, ce coût se situe à 17 fr./hab./a ou à environ 12 fr./EH/a.

Coût annuel d'une étape de traitement supplémentaire: env. 17 francs par habitant

Le coût annuel de l'épuration des eaux est aujourd'hui légèrement inférieur à 1 milliard de francs, tandis que le coût global de l'assainissement (réseau d'égouts et STEP) atteint quelque 2,2 milliards de francs. L'installation d'une étape de traitement supplémentaire accroît ce total d'environ 10 à 15 %. La valeur de remplacement des STEP de plus de 500 EH avoisine 10 milliards de francs (Peter 2009), de sorte que, pour elles aussi, la hausse est de 10 %. La valeur économique de remplacement de toutes les infrastructures publiques d'assainissement est de l'ordre de 65 milliards de francs (Peter 2009).

Hausse des coûts de 10 à 15 % au niveau national

5.5 Constat

- | | |
|--|--|
| <p>> L'optimisation ciblée de quelque 100 des plus de 700 STEP que compte la Suisse permettra de faire subir un traitement plus poussé à la moitié des eaux usées suisses et d'atteindre ainsi les objectifs consistant à réduire la charge polluante, à sauvegarder les écosystèmes et à protéger, à titre préventif, les ressources en eau potable.</p> | <p>Objectifs: réduire la charge polluante, sauvegarder les écosystèmes et protéger les ressources en eau potable</p> |
| <p>> L'installation d'une étape de traitement supplémentaire dans les STEP communales améliorera la qualité des eaux traitées et, dès lors, des cours d'eau. On escompte en particulier de nets bienfaits pour les cours d'eau qui charrient une proportion élevée d'eaux traitées.</p> | <p>Amélioration de la qualité des cours d'eau à forte proportion d'eaux traitées</p> |
| <p>> Véritable château d'eau de l'Europe, la Suisse porte la responsabilité du riverain d'amont. Des millions de personnes qui vivent le long du Rhin et du Rhône en tirent leur eau potable. Réduire les apports de micropolluants dans ces fleuves protégera dès lors de précieuses ressources en eau potable et répondra aux exigences de commissions internationales pour la protection des eaux.</p> | <p>Responsabilité du riverain d'amont</p> |
| <p>> La mise en service d'étapes de traitement supplémentaires dans les STEP accroîtra aussi bien leur consommation d'énergie que les coûts de l'épuration. La hausse dépendra des conditions propres à chaque cas (infrastructure existante, choix du procédé, composition des eaux usées, etc.). La consommation énergétique locale augmentera de 5 à 30 %, les coûts de 10 à 50 %.</p> | <p>La consommation énergétique augmentera de 5 à 30 %, les coûts de 5 à 50 %</p> |
| <p>> Les procédés d'épuration plus poussés n'exerceront qu'une influence minime sur la consommation électrique totale de la Suisse, celle-ci augmentera de 0,15 % au maximum. Le cas échéant, les besoins supplémentaires seront en partie compensés par un accroissement de l'efficacité et par le recours à des énergies renouvelables.</p> | <p>Influence minime sur le bilan énergétique national</p> |
| <p>> Le surcoût annuel du traitement supplémentaire des eaux usées se montera à quelque 130 millions de francs, soit environ 17 francs par habitant. Cela correspond à une hausse de 10 à 15 % du coût de l'épuration des eaux.</p> | <p>Hausse du coût de l'épuration à l'échelle nationale: 10 à 15 %</p> |

6 > Conclusions et perspectives

L'optimisation ciblée de certaines STEP peut réduire considérablement l'apport de micropolluants et améliorer dès lors nettement la qualité des eaux suisses. Tant l'adsorption sur charbon actif que l'ozonation éliminent en grande partie les micropolluants présents dans les eaux usées. Ces deux procédés sont techniquement applicables et leur coût est raisonnable.

6.1 L'épuration des eaux usées aujourd'hui

Les effluents des STEP communales constituent la principale voie d'apport de micropolluants dans les eaux suisses. Les stations d'épuration actuelles ont en effet été conçues pour éliminer, ou transformer, les matières solides, les composés organiques aisément dégradables et la plupart des nutriments (azote et phosphore) présents dans les eaux usées. Les étapes de traitement mécaniques et biologiques dont elles sont équipées traitent relativement bien les micropolluants biodégradables et ceux qui se fixent à des matières solides. Elles n'éliminent toutefois qu'une petite partie des micropolluants solubles dans l'eau, difficilement dégradables et donc persistants, qui parviennent ainsi en quantités préoccupantes dans les eaux.

Les traitements actuels n'éliminent qu'insuffisamment les micropolluants

Le taux d'élimination des micropolluants ne dépend guère des modes de traitement appliqués aujourd'hui dans les STEP. Il atteint en effet des valeurs similaires pour les divers procédés conventionnels (boues activées, lit fixe, lit fluidisé ou réacteur biologique séquentiel) et ni l'optimisation de l'exploitation ni des mesures simples au niveau des ouvrages ne l'améliorent sensiblement. On obtient certes un certain accroissement de la dégradation biologique en introduisant la nitrification, c'est-à-dire en portant l'âge des boues à 10 à 15 jours. Mais une hausse supplémentaire de l'âge des boues, au moyen d'un réacteur biologique à membrane par exemple, n'aura qu'un effet minime et ne conduira pas à une élimination complète des micropolluants. Seuls des procédés supplémentaires spécifiques sont à même de réduire nettement l'apport de micropolluants provenant des eaux usées urbaines.

Le taux d'élimination ne dépend guère des procédés de traitement conventionnels

6.2 Traitements supplémentaires

Les essais pilotes menés en Suisse de même que les expériences engrangées à l'étranger ont montré que l'adsorption sur charbon actif en poudre (CAP) et l'ozonation sont les mieux à même d'éliminer une grande partie des micropolluants des eaux usées urbaines. Les deux procédés s'intègrent en général sans problème dans les filières de traitement existantes et leur exploitation est aisée.

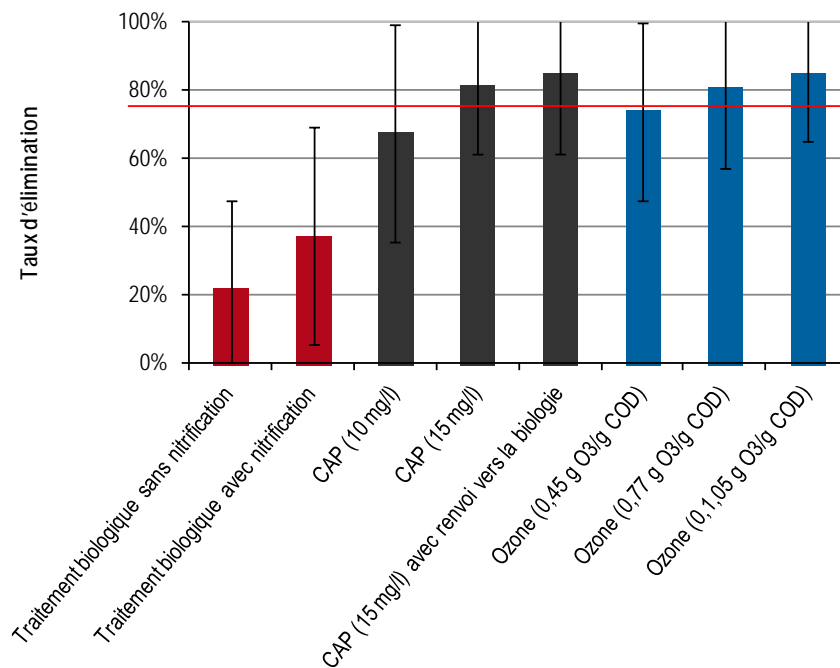
L'ozonation et le traitement au charbon actif sont à même d'éliminer les micropolluants

Les deux procédés améliorent considérablement la qualité des eaux traitées: ils éliminent en grande partie (> 80 %) nombre de substances et atténuent divers effets néfastes (action endocrinienne ou toxicité pour les algues, p.ex.) des micropolluants sur les organismes aquatiques. Ils débarrassent également les eaux usées de pratiquement toute coloration et des mauvaises odeurs. Selon le procédé choisi, on obtiendra en outre une bonne désinfection de l'eau (ozonation) ou une diminution de la charge organique résiduelle (CAP). L'efficacité des deux techniques dépend avant tout du dosage de l'agent utilisé, charbon actif ou ozone (fig. 19).

Élimination à plus de 80 %
de nombre de substances

Fig. 19 > Capacité du traitement biologique, de l'adsorption sur CAP et de l'ozonation à éliminer les micropolluants

Élimination d'une palette de 40 à 60 micropolluants au moyen de divers procédés: traitement biologique (avec et sans nitrification), adsorption sur CAP et ozonation (différents dosages). Une dose minimale de CAP et d'ozone est requise pour garantir un taux d'élimination supérieur à 80 %.



Données: Regensdorf (Abegglen et al. 2009), Lausanne (Margot et al. 2010), Kloten/Opfikon (Böhler et al. 2011) et Eawag (Zwickenpflug et al. 2009)

Dans l'absorption sur charbon actif, les micropolluants se fixent dans les micropores du charbon et sont ainsi éliminés des eaux usées. Il est possible d'augmenter l'efficacité de ce procédé en renvoyant le charbon utilisé vers la biologie. L'ozonation engendre quant à elle une oxydation, c'est-à-dire que les polluants subissent une transformation chimique. Nombre d'études ont vérifié si elle conduisait à la formation de composés problématiques, susceptibles d'accroître la toxicité des eaux traitées. Le plus souvent ce n'est pas le cas, mais on a parfois observé une légère hausse de la toxicité due à la présence de produits réactifs de l'oxydation. Pour garantir leur dégradation à la STEP, il est recommandé de faire suivre l'ozonation d'une étape biologique, en ayant recours à un filtre à sable ou un lit fluidisé.

Modes d'action:
adsorption et oxydation

Tant l'adsorption sur CAP que l'ozonation sont techniquement au point et peuvent dès à présent être appliquées dans les STEP existantes. Leurs conséquences sur l'exploitation, la consommation énergétique et les coûts dépendent de la taille de l'installation, de l'infrastructure existante, de la composition des eaux usées et du procédé retenu. La consommation énergétique d'une STEP augmente de 5 à 30 % (en termes d'énergie brute, sans traitement subséquent), les coûts de 5 à 30 % (sans traitement subséquent, en proportion des coûts de l'épuration des eaux usées, sans le réseau d'égouts).

Les deux procédés peuvent être appliqués à grande échelle

Le tab. 9 compare les deux procédés.

Tab. 9 > Ozonation et adsorption sur CAP

Les données fournies pour le taux d'élimination, l'énergie et les coûts se basent sur une station d'épuration de 50 000 EH et des doses de 12 à 15 g CAP ou de 3 à 5 g O₃ par m³ d'eaux traitées. Ces données ne tiennent pas compte de la filtration subséquente. Elles indiquent uniquement un ordre de grandeur et peuvent varier de cas en cas.

	Ozonation	Traitement au CAP
Mode d'action	Oxydation	Adsorption
Dose requise	3 à 5 g O ₃ /m ³ (0,7 à 0,9 g O ₃ /g COD)	12 à 15 g CAP/m ³
Taux (moyen) d'élimination des micropolluants	> 80 %	> 80 %
Ecotoxicité	Nette atténuation	Nette atténuation
Germes (pathogènes)	Désinfection partielle	-
Paramètre global subst. org. et nutriments	Diminution des concentrations de nitrites	Réduction de la DCO et élimination du COD (env. 40 %)
Autres effets	Elimination de la coloration et des odeurs	Elimination de la coloration et des odeurs
Traitement subséquent	Etape biologique destinée à dégrader les produits réactifs de l'oxydation	Filtration destinée à retenir la fraction fine
Ressources utilisées	Oxygène, courant électrique, eau de refroidissement	CAP, précipitant, floculant, courant électrique
Electricité supplémentaire consommée à la STEP	0,05 à 0,1 kWh/m ³ , 6 à 12 kWh/EH/a	0,01 à 0,04 kWh/m ³ , 1 à 5 kWh/EH/a
Conso. d'énergie primaire	0,3 kWh/m ³ , 38 kWh/EH/a	0,37 kWh/m ³ , 45 kWh/EH/a
Coûts	0,1 fr. par m ³ d'eaux traitées, 12 fr./EH/a	0,15 fr. par m ³ d'eaux traitées, 18 Fr./EH/a
Conséquences sur l'exploitation de la STEP	Hausse de la consommation électrique (10 à 30 %) Mesures de sécurités accrues	Faible hausse de la consommation électrique (5 %) Hausse du rendement en boues (5 à 10 %), Modification des propriétés des boues (effet abrasif et corrosif accru)
Sécurité	Surveillance O ₂ et O ₃ dans l'air ambiant Protection anti-feu dans la zone où est entreposé/utilisé l'oxygène pur Formation du personnel	Protection respiratoire lors de la manipulation du CAP

Outre l'ozonation et l'adsorption sur CAP, toute une gamme d'autres procédés peuvent entrer en ligne de compte pour éliminer les micropolluants. Voici pourquoi ils ne sont pas encore applicables: ils n'ont pas été testés à grande échelle (tel le charbon actif en grains), ils posent (encore) de grosses difficultés techniques ou économiques (nanofiltration et oxydation avancée, p. ex), leur étude et leur mise au point ne sont pas ache-

D'autres procédés sont à l'étude pour le traitement supplémentaire des eaux usées

vées (ferrate et nanomatériaux, p. ex.) ou alors ils ne conviennent pas faute d'efficacité (tels le traitement biologique complémentaire ou les réacteurs biologiques à membrane). Vu le rythme des progrès et des innovations techniques, on découvrira sans doute bien d'autres traitements appropriés.

6.3 Conséquences pour les eaux

Le recours à des étapes de traitement supplémentaires permet de protéger les écosystèmes contre des atteintes néfastes, de diminuer les charges de micropolluants et de protéger les ressources en eau potable à titre préventif. Ces objectifs peuvent être atteints en étendant la filière de traitement de certaines STEP, car il serait peu judicieux et disproportionné d'optimiser toutes les STEP de Suisse.

La protection des écosystèmes revêt en particulier une grande importance lorsque l'effluent d'une STEP représente une grande proportion du débit dans le milieu récepteur. Grâce aux étapes de traitement supplémentaires, les écosystèmes profiteront des bienfaits suivants:

- > Réduction notable des apports de micropolluants dans les eaux: leurs concentrations s'abaisseront nettement au-dessous du seuil critique dans les cours d'eau charriant une grande proportion d'eaux traitées.
- > Atténuation des effets néfastes sur la reproduction et le développement d'organismes aquatiques.
- > Augmentation du nombre d'espèces sensibles dans les cours d'eau charriant une grande proportion d'eaux traitées (biodiversité).

Sur le Plateau suisse, plusieurs cours et plans d'eau servent non seulement de milieu récepteur aux effluents de STEP communales (grands lacs, Limmat, Rhin, etc.), mais aussi, directement ou indirectement (via le filtrat de rive), à la production d'eau potable. Le Rhin fournit quant à lui de l'eau potable à environ 20 millions de personnes. La mise en place d'une étape de traitement supplémentaire dans les très grandes STEP et dans les STEP qui déversent leur effluent dans des cours d'eau servant à la production d'eau potable débouchera sur les améliorations suivantes:

- > Diminution notable des charges de micropolluants dans les eaux, ce qui permettra à la Suisse d'assumer sa responsabilité de riverain d'amont envers les Etats voisins.
- > Réduction des apports de substances dans les eaux brutes, ce qui garantira la protection des ressources en eau à titre préventif.

L'optimisation de l'épuration des eaux usées permettra d'améliorer considérablement la qualité de l'eau. Ce progrès passe par une hausse raisonnable de la consommation énergétique et des coûts. Pour équiper environ 100 des plus de 700 STEP que compte la Suisse, et assurer ainsi le traitement supplémentaire de la moitié des eaux usées du pays, il faut compter environ 130 millions de francs par an. Réparti sur toute la population, ce montant correspond à un surcoût annuel de 17 francs par habitant. Quant à la consommation suisse d'électricité, elle augmentera au pire d'environ 0,15 %.

Il est judicieux de prévoir une optimisation ciblée de l'épuration des eaux

Avantages écologiques pour les cours d'eau

Protection des ressources en eau potable

Bon rapport coût-efficacité

6.4

Perspectives

Fin 2009, le DETEC avait ouvert une audition sur une modification de la LEaux. Celle-ci visait à inscrire dans la législation des mesures à prendre dans certaines STEP communales afin de réduire l'apport de micropolluants (médicaments et composés chimiques) dans les eaux et de protéger ainsi les ressources en eau potable, de même que la faune et la flore aquatiques. Les résultats de cette audition sont à présent connus. Dans plus de 80 % des avis exprimés, les organismes consultés reconnaissent qu'il importe d'apporter une solution au problème des micropolluants. L'idée d'un train de mesures ciblé et l'optimisation de certaines STEP bénéficient également d'un large soutien.

Voici les principales critiques et demandes formulées dans les prises de position:

- > Il importe de trouver un mode de financement à l'échelle nationale qui soit conforme au principe du pollueur-payeur.
- > Il convient de mener d'autres essais à grande échelle pour tester les technologies envisagées avant d'en équiper plus de 100 STEP suisses.
- > L'optimisation des STEP doit faire l'objet d'une planification coordonnée à l'échelle fédérale (planification au niveau des bassins versants, meilleure prise en considération des conditions locales, intégration dans une stratégie globale «garantie de la qualité de l'eau»).

Les résultats détaillés de l'audition ont été portés à la connaissance de la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil des Etats (CEATE-CE), qui soutient le principe d'un financement conforme au principe de causalité et la création des bases légales requises. Une motion allant dans ce sens – «Substances en traces dans les eaux usées. Financement de leur élimination selon le principe du pollueur-payeur» (10.3635 – Motion) – a été adoptée par le Conseil fédéral et les Chambres fédérales. Voici les travaux actuellement en cours:

- > *Mode de financement:* Puisque toute la population suisse est responsable de la présence de micropolluants dans les eaux, le Parlement estime que toute la population doit contribuer à atténuer le problème. L'équipement des STEP devant être ciblé et non pas général, on élabore un mode de financement à l'échelle fédérale, qui respecte au mieux le principe du pollueur-payeur.
- > *Planification et financement des mesures:* La procédure de sélection des STEP à équiper doit être uniformisée au niveau national. A cet effet, Confédération et cantons, ainsi que détenteurs et exploitants de STEP vont définir ensemble des exigences pour régir la planification et le financement des mesures. Leur mise en application devra respecter le rythme normal du renouvellement des STEP. Diverses questions seront abordées: procédure d'évaluation de l'impact sur l'eau potable, délimitation des eaux industrielles, choix des STEP fondé sur une gestion par bassin versant, etc.

Financement conforme au principe du pollueur-payeur

Planification coordonnée des mesures

> *Plateforme consacrée aux bases techniques*: Tant l'ozonation que l'adsorption sur CAP constituent des nouveautés pour les spécialistes du traitement des eaux. Les connaissances pratiques concernant la planification, le dimensionnement, la construction et l'exploitation des installations sont donc encore limitées. Une plateforme d'échange verra donc le jour, qui permettra aux ingénieurs et aux exploitants de STEP, mais aussi aux autorités, de développer leurs compétences dans le domaine des traitements supplémentaires destinés à éliminer les micropolluants. Cette plateforme sera rattachée à l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA). Outre l'échange d'informations et le développement de compétences au niveau national, elle servira aussi à entretenir les contacts internationaux.

Développement de compétences en matière de procédés de traitement supplémentaires

Les effluents de STEP communales ne constituent pas la seule voie d'apport de micropolluants dans les eaux. Les produits phytosanitaires emportés par ruissellement sur les terrains agricoles et les substances entraînées par les eaux s'écoulant des voies de communication (routes et voies ferroviaires) en sont d'autres exemples. Ces apports se distinguent de ceux dus aux eaux usées urbaines non seulement par leur provenance, mais principalement par la palette des substances problématiques et par leur dynamique, car les polluants parviennent surtout dans les eaux avec la pluie. Or, dans une approche globale du problème, l'application de mesures visant à optimiser les STEP communales doit aussi prendre en compte les micropolluants provenant de sources diffuses.

Les micropolluants provenant d'autres sources

La législation sur la protection des eaux des pays de l'Union européenne découle de la directive européenne sur l'eau. Celle-ci comprend une liste de substances prioritaires, qui doivent respecter des objectifs de qualité. Un complément à cette liste est actuellement en préparation. On envisage notamment d'y inclure les micropolluants qui parviennent principalement dans les eaux via les stations d'épuration. Ces travaux présentent également un grand intérêt pour la Suisse.

La directive européenne sur l'eau sera probablement étendue à certains micropolluants

Des mesures à la source, soit au niveau de la législation ou du bassin versant, peuvent par ailleurs contribuer à réduire l'apport de micropolluants dans les eaux. Vu la variété des substances et la diversité de leurs usages, ces mesures ne suffisent toutefois pas, à elles seules, pour réduire de manière significative l'apport de micropolluants dans l'ensemble du pays. Les mesures à la source offrent néanmoins une approche complémentaire judicieuse, surtout pour lutter contre des substances particulièrement problématiques. On y recourra donc le cas échéant.

Mesures à la source: un moyen de lutte complémentaire

Lancé en 2006 et s'achevant avec la publication du présent rapport, le projet «Stratégie Micropoll» avait pour objectif de quantifier les apports de micropolluants provenant des eaux usées urbaines et d'élaborer une stratégie destinée à réduire ces apports. Il a permis d'établir que les micropolluants provenant des eaux usées urbaines détériorent la qualité des eaux et que l'optimisation des STEP offre une solution efficace, réalisable sur le plan technique et raisonnable du point de vue économique.

Le projet «Stratégie Micropoll» s'achève ici

> Annexes

A1 Substances présentes en Suisse et objectifs de qualité proposés

Tab. 10 > Fréquence des substances présentes dans les eaux en Suisse

Substance	Présence dans les eaux de surface et dans les stations d'épuration suisses, base de données Micropoll (OFEV 2010) état en avril 2010						Critère de qualité chronique (NQE-LT) (ng/l)
	Eaux de surface			Effluents de STEP			
	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	
Médicaments							
Acide méfénamique (analgésique)	49/75	205	275	18/18	843	1160	150000
Aténolol (bêtabloquant)	1/43	12	k.A.	18/19	175	327	90
Azithromycine (antibiotique)	10/66	24	36	12/15	139	251	460
Béazafibrate (hypolipémiant)	112/509	13	43	78/78	482	790	500
Carbamazépine (antiépileptique)	4/4	490	1011	6/6	1551	1882	100
Carbamazépine-10,11 – Dihydro-10,11-Dihydroxy (produit de transformation)	37/74	30	73	32/32	276	497	60
Clarithromycine (antibiotique)	15/53	206	482	7/10	598	1420	
Diatrizoate (=acide amidotri-zoïque) (contrastant radiologique)	77/137	65	150	54/54	647	1170	50
Diclofénac (analgésique)	6/28	25	44	17/17	42	75	40
Erythromycine ¹⁾ (antibiotique)	4/99	5	10	6/27	2	3	0,037
Ethinylœstradiol (œstrogène synthétique)	16/137	35	52	54/54	394	1439	300
Ibuprofène (analgésique)	9/53	275	91	9/19	380	295	
Ioméprol (contrastant radiologique)	14/53	92	51	15/19	377	880	
Iopamidol (contrastant radiologique)	21/53	96	65	13/19	876	2460	
Iopromide (contrastant radiologique)	7/28	7	14	10/10	870	1658	4000
Metformine (antidiabétique)	13/13	713	3057	6/6	10347	13427	

Substance	Présence dans les eaux de surface et dans les stations d'épuration suisses, base de données Micropoll (OFEV 2010) état en avril 2010						Critère de qualité chronique (NQE-LT) (ng/l)
	Eaux de surface			Effluents de STEP			
	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	
Métoprolol (bêtabloquant)	24/57	20	50	17/17	166	322	64 000
Naproxène (analgésique)	22/137	37	82	38/39	462	678	1700
N4-Acétylsulfaméthoxazole (produit de transformation)	39/74	63	189	21/21	435	730	100
Sotalol (bêtabloquant)	34/66	26	59	34/34	238	427	600
Sulfaméthoxazole (antibiotique)	5/40	3	17	5/6	67	157	
Triméthoprime (antibiotique)	26/74	13	36	42/45	100	163	60 000

Substances utilisées pour leur effet biocide, soumises à autorisation

2,4-D (herbicide)	16/125	67	53	4/6	13	25	
AMPA (produit de transformation)	37/73	16	34	17/30	81	170	
Carbendazime (fongicide)	367/1211	15	30	40/84	173	494	
Diazinone (insecticide)	236/331	135	120	11/55	593	817	
Diéthyltoluamide (DEET) (répulsif)	14/355	22	34	k.A.	k.A.	k.A.	
Diméthoate (insecticide)	98/697	54	70	13/34	1379	201	
Diuron (herbicide)	64/162	373	637	k.A. *)	k.A.	k.A.	
Glyphosate (herbicide)	60/162	140	290	k.A. *)	k.A.	k.A.	
Irgarol (herbicide)	18/878	3	k.A.	9/29	30	58	
Isoproturon (herbicide)	211/1001	315	820	11/14	12	35	
MCPA (herbicide)	56/137	40	111	6/6	25	44	
Mécoprop et Mécoprop-P (herbicide)	100/188	45	74	26/29	424	765	
Triclosan (microbicide)	3/12	20	31	6/6	116	224	

Substance	Présence dans les eaux de surface et dans les stations d'épuration suisses, base de données Micropoll (OFEV 2010) état en avril 2010						Critère de qualité chronique (NQE-LT) (ng/l)
	Eaux de surface			Effluents de STEP			
	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	# détections / # mesures (-)	concentration moyenne (ng/l)	

Substances ayant un effet sur l'équilibre hormonal (perturbateurs endocriniens qui ne sont pas utilisés comme médicaments)

Bisphénol A (BPA) (additif)	44/66	840	3440	22/25	331	679	
Estradiol (œstrogène naturel)	17/92	2	3	18/28	3	5	0,4
Estrone (œstrogène naturel)	36/116	2	3	26/30	15	35	3,6
Nonylphénol (additif, coformulant)	15/25	441	1100	7/7	267	353	13
Sulfonate de perfluorooctane (SPFO) (substance tensio-active)	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	

Autres substances déployant des effets sur l'environnement

Acésulfame (E950) (édulcorant artificiel)	24/24	4 010	6 200	4/4	22 500	30 700	
Benzothiazole⁴⁾ (additif)	4/4	373	862	6/6	494	662	
Benzotriazole (agent complexant, produit anticorrosif)	366/382	1 230	2 990	41/41	12 881	17 300	30 000
EDTA (agent complexant)	202/248	2 820	5 380	10/10	20 930	30 290	2 200 000
Méthylbenzotriazole (agent complexant, produit anticorrosif)	303/331	249	516	30/30	1 140	1 950	75 000
NTA (agent complexant)	183/253	2 890	5 800	10/10	5 370	6 930	190 000
Sucralose (E955) (édulcorant artificiel)	12/13	540	1 039	6/6	4 600	6 523	

Götz et al. 2010b, NQE-LT: Centre Ecotox 2011

A2 Substances étudiées et plages de concentration

Tab. 11 > Concentrations des substances analysées à Regensdorf, à Lausanne et à l'Eawag

Concentrations (moyennes) mesurées à l'entrée de la STEP (ou après l'épuration préliminaire), à la sortie de l'épuration biologique (décanteur final) et à la sortie de l'étape d'épuration supplémentaire. Si toutes les substances testées ne sont pas énumérées, il a été néanmoins tenu compte de toutes les campagnes de mesures, même celles effectuées dans des conditions défavorables.

	Regensdorf			Lausanne			Eawag		
	Déc. primaire	Déc. final	O ₃	Arrivée	Déc. primaire	Déc. final	Déc. primaire	Déc. final	CAP
Aténolol	3155 ± 1151	2338 ± 1367	238	1401 ± 937	837 ± 588	181	1542 ± 477	975	<LOQ
Bézafibrate	405 ± 121	70 ± 31	30	964 ± 254	555 ± 252	176	377 ± 141	309	<10
Carbamazépine	711 ± 354	686 ± 308	14	522 ± 620	533 ± 317	95	269 ± 142	111	<10
Clarithromycine	410 ± 174	226 ± 103	15	763 ± 441	567 ± 347	100	646 ± 433	347	9
Clindamycine	52 ± 31	33 ± 15	<3	65 ± 33	159 ± 79	29			
Diatrizoate	142 ± 286	45 ± 51		597 ± 628	622 ± 400	546	177 ± 207	149	94
Diclofénac	1394 ± 340	1023 ± 304	<13	1124 ± 477	920 ± 310	83	1214 ± 271	1082	13
Gabapentine				3977 ± 1528	3252 ± 1137	3322			
Gemfibrozil				411 ± 128	116 ± 69	51			
Ibuprofène	3782 ± 953	75 ± 13	<20	4101 ± 2465	578 ± 760	97	4762 ± 1009	546	<10
Iohexol	2447 ± 2371	486 ± 423		21651 ± 6054	16271 ± 11373	8374	1283 ± 1591	1591	163
Ioméprol	67 ± 81	79 ± 90		15041 ± 9792	13021 ± 7152	7206	287 ± 671	23	<LOQ
Iopamidol	51 ± 55	38 ± 33		3019 ± 2109	2274 ± 1218	1331	87 ± 67	75	24
Iopromide	4107 ± 3388	1621 ± 1654		6300 ± 2599	5797 ± 2956	3150	6149 ± 6046	2465	228
Kétoprofène				1119 ± 1328	1005 ± 1020	268			
Acide méfénamique	2504 ± 719	163 ± 33	<12	946 ± 455	493 ± 338	39	2138 ± 835	332	4
Métoprolol	538 ± 148	402 ± 111	60	561 ± 299	933 ± 432	76			
Métronidazole				1168 ± 866	380 ± 257	161			
Naproxène	671 ± 204	249 ± 55	29	677 ± 332	468 ± 345	141	793 ± 492	702	<10
Norfloxacine				334 ± 167	27 ± 16	7			
Ofloxacine				234 ± 60	58 ± 29	9			
Paracétamol	33764 ± 11472		<120	48761 ± 33111	3 ± 4				
Primidone	86 ± 34	67 ± 29	23	110 ± 38	106 ± 30	69	123 ± 57	82	12
Propranolol	97 ± 59	91 ± 41	28	127 ± 37	108 ± 17	2			
Sotalol	445 ± 130	414 ± 90	27	282 ± 182	232 ± 67	72			
Sulfaméthoxazole	282 ± 184	213 ± 143	<15	264 ± 229	227 ± 128	84	548 ± 267	512	84
Triméthoprime	154 ± 54	118 ± 48	<9	216 ± 50	106 ± 30	15			
Benzotriazole	13921 ± 10588	7015 ± 3950	1830	9231 ± 3176	6938 ± 2537	1125	10199 ± 5192	3774	29
Méthylbenzotriazole	1397 ± 855	1103 ± 575	240	5720 ± 2810	2594 ± 903	133	10286 ± 3347	4716	17
Atrazine	31 ± 22	31 ± 29	21	21 ± 16	11 ± 2	4			
Carbendazime	100 ± 48	94 ± 69	18	106 ± 92	171 ± 91	14	35 ± 12	60	<5
Diazinone	176 ± 330	103 ± 146	27	191 ± 228	74 ± 38	7			
Diuron				69 ± 49	51 ± 55		67 ± 47	131	<LOQ
Irgarol	26 ± 8	15 ± 4	<3	16 ± 14	2 ± 1	4			
Isoproturon	87 ± 75	65 ± 42	7	62 ± 67	49 ± 41	27	12 ± 13	66	
Mécoprop	316 ± 377	597 ± 917	110	275 ± 305	383 ± 943	139	503 ± 672	915	<5

	Regensdorf			Lausanne			Eawag		
	Déc. primaire	Déc. final	O ₃	Arrivée	Déc. primaire	Déc. final	Déc. primaire	Déc. final	CAP
Propiconazole				59 ± 28	31 ± 15	< 10	316 ± 633	14	
Terbutryne	49 ± 24	31 ± 11	< 5	37 ± 22	19 ± 17	12	78 ± 102		< 5
Triclosan				1933 ± 922	1223 ± 667	1109	710 ± 494	96	< 10
Bisphénol A	2420 ± 2068	290 ± 183	30	834 ± 460	157 ± 162	1317			
Estrone	67 ± 15	3 ± 2	< 0,4	134 ± 87	68 ± 101	n.b.			
Nonylphénol	972 ± 665	477 ± 259	n.b.	3691 ± 3363	1166 ± 172	2379			

Données tirées des essais menés à Regensdorf (Hollender et al. 2009), à Lausanne (Margot et al. 2010) et à l'Eawag (Zwickenpflug et al. 2010).

A3 Taux d'élimination obtenus par ozonation et par le procédé au CAP

Tab. 12 > Taux d'élimination moyen obtenu par les différentes étapes d'épuration

Taux d'élimination moyen obtenus par épuration biologique (sortie décanteur primaire – décanteur final) et grâce aux procédés complémentaires (après la sortie du décanteur final) pour une sélection de substances. Les moyennes sont calculées sur l'ensemble des essais effectués (dosages variables).

	Regensdorf		Lausanne			Eawag	
	Biologie	Ozonation	Biologie	Ozonation	CAP	Biologie	CAP
Aténolol	31 %	79 %	53 %	> 83 %	77 %	37 %	97 %
Bézafigrate	81 %	> 68 %	46 %	78 %	69 %	78 %	> 92 %
Carbamazépine	10 %	> 99 %	11 %	96 %	82 %	17 %	> 88 %
Clarithromycine	44 %	> 96 %	36 %	92 %	84 %	64 %	> 93 %
Clindamycine	39 %	> 86 %		99 %	78 %		
Diatrizoate	42 %	31 %	24 %	18 %	15 %	27 %	25 %
Diclofénac	26 %	> 99 %	6 %	93 %	62 %	12 %	> 81 %
Gabapentine			8 %	39 %	0 %		
Gemfibrozil			59 %	> 94 %			
Ibuprofène	98 %	> 76 %	91 %	63 %	> 71 %	91 %	> 82 %
Iohexol	73 %		42 %	42 %	48 %	25 %	72 %
Ioméprol	32 %		28 %	44 %	50 %	9 %	n.b.
Iopamidol	32 %		20 %	42 %	44 %	21 %	57 %
Iopromide	62 %	16 %	30 %	38 %	43 %	22 %	81 %
Kétoprofène			49 %	63 %	77 %		
Acide méfénamique	93 %	> 94 %	51 %	> 98 %	91 %	89 %	> 94 %
Métoprolol	24 %	81 %		88 %	93 %		
Métronidazole			75 %	64 %	> 71 %		
Naproxène	61 %	> 96 %	43 %	> 89 %	> 69 %	38 %	> 89 %
Norfloxacine			94 %	> 75 %	> 79 %		
Ofloxacine			76 %	> 85 %	> 81 %		
Paracétamol	98 %		100 %	> 15 %			
Primidone	21 %	67 %	18 %	55 %	37 %	7 %	80 %
Propranolol	13 %	> 80 %	24 %	> 99 %	> 99 %		
Sotalol	9 %	> 96 %	28 %	> 98 %	68 %		
Sulfaméthoxazole	23 %	> 86 %	27 %	> 88 %	50 %	10 %	50 %
Triméthoprime	22 %	> 91 %	43 %	> 98 %	86 %		
Benzotriazole		63 %	25 %	62 %	80 %	56 %	88 %
Méthylbenzotriazole	18 %	77 %	48 %	80 %	94 %	58 %	93 %
Atrazine	16 %	40 %	14 %	35 %	65 %		
Carbendazime	34 %	> 52 %	2 %	> 79 %	> 88 %	6 %	> 87 %
Diazinone	35 %	63 %		n.b.	90 %		
Diuron				> 65 %	> 70 %	15 %	n.b.
Irgarol	43 %	> 79 %	43 %	> 38 %	> 22 %		
Isoproturon	35 %	> 76 %	29 %	> 48 %	49 %	0 %	76 %
Mécoprop	10 %	66 %	23 %	60 %	31 %	72 %	76 %

	Regensdorf		Lausanne			Eawag	
	Biologie	Ozonation	Biologie	Ozonation	CAP	Biologie	CAP
Propiconazole			33 %	35 %	> 67 %		
Terbutryne	38 %	> 80 %	48 %	82 %	41 %		
Triclosan			27 %	> 78 %	> 86 %	0 %	> 50 %
Bisphénol A	71 %	63 %	78 %	79 %	> 86 %		
Estrone	95 %	> 94 %		> 83 %	> 92 %		
Nonylphénol	59 %	87 %	78 %	n.b.	11 %		

Données tirées des essais menés à Regensdorf (Hollender et al. 2009), à Lausanne (Margot et al. 2010) et à l'Eawag (Zwickenpflug et al. 2010).

> Remerciements

Un grand nombre de personnes – représentants des autorités, d'associations professionnelles, de l'économie privée, de l'industrie et de la recherche – ont contribué au projet «Stratégie Micropoll». Leur engagement et leur compétence ont constitué l'élément clé qui nous a permis de mener à bien ce projet et d'acquérir les connaissances résumées dans le présent rapport. Nous voudrions exprimer ici notre profonde gratitude envers tous ceux qui ont participé aux divers groupes de travail et aux activités menées dans le cadre de ce projet. Et adresser un merci tout particulier aux cantons de Zurich et de Vaud, ainsi qu'à la commune de Regensdorf et à la ville de Lausanne, qui ont accueilli les essais à grande échelle dans leurs installations et apporté leur soutien financier.

Les auteurs tiennent également à remercier le groupe d'experts en écotoxicologie, qui ont assuré la conception et le suivi scientifique des nombreux essais écotoxicologiques qu'a nécessités le projet:

Nathalie Chèvre (Université de Lausanne), Rik Eggen (Eawag), Beate Escher (Eawag/Université du Queensland), Daniel Dietrich (Université de Constance), Jeanne Garric (CEMAGREF), Almuth Gerhardt (Centre Ecotox), Benoît Ferrari (Université de Genève/CEMAGREF), Christoph Hafner (Hydrotox), Patricia Holm (Université de Bâle), Matthias Liess (Umweltforschungszentrum Leipzig), Jörg Oehlmann (Université de Francfort), Serge Santiago (Soluval), Kristin Schirmer (Eawag), Ralf Schulz (Université de Landau), Micro Weil (ECT), Claudia Wiegand (IGB Berlin), Inge Werner (Centre Ecotox).

Les auteurs remercient également les groupes de travail et de rédaction pour la source d'inspiration qu'ont constituée nos discussions et pour leurs précieuses contributions à l'élaboration du présent rapport. Un grand merci également aux personnes suivantes pour leur relecture attentive du manuscrit et pour leurs retours constructifs:

Adriano Joss, Juliane Hollender, Anita Wittmer, Kristin Schirmer, Andri Bryner, Sabrina Strähl (Eawag), Inge Werner (Centre Ecotox), Thomas Wintgens (FHNW), René Gälli (BMG Engineering), Michael Thomann (Holinger AG), Ueli Sieber, Paul Liechti, Bettina Hitzfeld (OFEV), Markus Koch (VSA), Philippe Vioget (VD), Pierre Mange (VS), Christoph Egli (AVA Altenrhein), Richard Gamma, Gerhard Stucki (Scienceindustries), Silvio Beier (TU Hamburg), Steffen Metzger (HES Biberach), Klaus Alt (Hydro-Ingenieure GmbH), Jochen Weinbrecht (Ministère de l'environnement du Bade-Wurtemberg).

> Bibliographie

- Abegglen C., Böhler M., Hollender J., Zimmermann S., Zwickenpflug B., von Gunten U., Siegrist H., Thonney D. 2010: Mikroverunreinigungen in Kläranlagen – Technische Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. *Gas, Wasser, Abwasser* 7/2010.
- Abegglen C., Escher B., Hollender J., Koepke S., Ort C., Peter A., Siegrist H., von Gunten U., Zimmermann S., Koch M., Niederhauser P., Schärer M., Braun C., Gälli R., Junghans M., Brocker S., Moser R., Rensch D. 2009: Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Eawag, AWEL, BAFU, BMG, Hunziker Betatech.
- Abegglen C., Siegrist H. 2010: Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA – Energetische Aspekte. Eawag. Unveröffentlichte Studie.
- Abegglen C., Beier S., Pinnekamp J., Mauer C., Siegrist H. 2011: Mikroverunreinigungen – Energieverbrauch und Kosten weitergehener Verfahren auf kommunalen ARA. *Gas, Wasser, Abwasser* 7/2011, p. 479–486.
- ADR: Accord européen du 30 septembre 1957 relatif au transport international des marchandises dangereuses par route. Etat 1.1.2011.
- Agenda 21 pour l'eau: www.wa21.ch.
- Alt K., Barnscheidt I. 2011. Kosten des Einsatzes von Aktivkohle in bestehenden Flockungfiltrationsanlagen. Entwurf (cf. ISA 2011).
- Ashauer R. submitted. Post-ozonation in a municipal wastewater treatment plant improves water quality in receiving stream as indicated by the abundance of species at risk.
- Axpo 2011: Kraftwerk Reckingen AG. www.axpo.ch/axpo/fr/hydroenergie/wissen/partnerkraftwerkevonaxpoaggfuehrt/reckingen.html (10.11.2011).
- Bahr C., Ernst M., Jekel M., Heinzmann B., Luck F., Ried A. 2007: Pilotox – Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ-biologischen Behandlung von Klärwerksabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion. Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Band 5.
- Bahr C., Ernst M., Heinzmann B., Jekel M., Luck F., Ried A. 2007: Ozonung von gereinigtem Abwasser zur Spurenstoffentfernung und Desinfektion. *Korrespondenz Abwasser* 54(9), p. 902–908.
- Batt A., Kim S., Aga D. 2007. Comparison of the occurrence of antibiotics in four full-scale wastewater treatment plants with varying designs and operations. *Chemosphere* 68, p. 428–435.
- Bayer P., Heuer E., Karl U., Finkel M. 2005: Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. *Wat.Res.* 39, p. 1719–1728.
- Behra R., Kägi R., Navarro E., Burkhardt M., Sigg L. 2009: Les nanoparticules synthétiques et leurs effets. *Eawag News* 67/2009, p. 22–24.
- Beier S. 2010: Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser. Dissertation, RWTH Aachen.
- Benner J., Salhi E., Ternes T., von Gunten U. 2008: Ozonation of reverse osmosis concentrate: Kinetics and efficiency of beta blocker oxidation. *Wat.Res.* 42, p. 3003–3012.
- Bernhard M., Müller J., Knepper T. 2006: Biodegradation of persistent polar pollutants in wastewater: Comparison of an optimised lab-scale membrane bioreactor and activated sludge treatment. *Wat.Res.* 40, p. 3419–3428.
- Bernhard S. 2010: Der Einfluss von Arzneistoffen auf aquatische Invertebraten. Dissertation an der Fakultät für Biologie der Ludwigs-Maximilian Universität München.
- BG 2011: Trinkwasser aus der Kläranlage? BG-21.com.
- BG 2012: Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.
- Blank B., Marinas B., Corsaro K., Rakness K. 1993: Enhancement of Wastewater Disinfection Efficiency in Full-Scale Ozone Bubble-Diffuser Contactors. *Ozone: Science and Engineering* 15(4), p. 295–310.
- Blüm W., McArdeil C., Hoehn E., Schaubhut R., Labhart W., Bertschi S. 2005: Organische Spurenstoffe im Grundwasser des Limmattals – Ergebnisse der Untersuchungskampagne 2004. AWEL Zürich.
- Böhler M., Siegrist H. 2007: Potential of activated sludge ozonation. *Wat.Sci.Techn.* 55(12), p. 181–187.
- Böhler M., Joss A., Miladinovic N., Siegrist H., Sterkele B., Ternes T., Fink G., Liebi C., Wullschleger W., Koch M., Wiederkehr p. 2009: Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon. Zwischenbericht. Eawag, Dübendorf.
- Böhler M., Zwickenpflug B., Grasse M., Behl M., Neuenschwander S., Siegrist H., Dorusch F., Hollender J., Sinnet B., Ternes T., Fink G., Liebi C., Wullschleger W. 2011: Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon. Abschlussbericht. Eawag, Dübendorf.
- Brentano M. 1934: Untersuchungen über die Abwasserverhältnisse von Zürich. Diss ETH Nr. 798.
- Brügger R., Moser R., Koch G. 2010: Elimination von Mikroverunreinigungen – Am Beispiel des Kantonsspitals Liestal. *Gas, Wasser, Abwasser* 7/2010, p. 595–601.
- Bundschuh M., Pierstorf R., Schreiber W., Schulz R. 2011: Positive effects of wastewater ozonation displayed by in situ bioassays in the receiving stream. *Env.Sci.Techn.* 45, p. 3774–3780.

- Bürge I., Poiger T., Müller M., Buser H. 2003: Caffeine, an Anthropogenic Marker for Wastewater Contamination of Surface Waters. *Env.Sci.Techn.* 37(4), p. 691–700.
- Burkhardt-Holm P., Giger W., Guttinger H., Ochsenbein U., Peter A., Scheurer K., Segner H., Staub E., Suter M. 2005: Where have all the fish gone? *Env.Sci.Techn.* 39, p.441A-447A.
- Burkhardt M., Zuleeg S., Boller M., Kägi R., Sinnert B., Traber J., Siegrist H. 2010: Charakterisierung und Bilanzierung von Silberpartikeln in Abwasserreinigungsanlagen. Studie im Auftrag des BAFU und AWEL. Eawag, Dübendorf.
- Burkhardt M. 2011: Regenwasserabfluss soll sauberer werden. HSR-Magazin 1/2011. Hochschule für Technik Rapperswil.
- Carballa M., Omil F., Lema J., Llompert M., Garcia-Jares C., Rodriguez I., Gomez M., Ternes T. 2004: Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant. *Wat.Res.* 38, p. 2918–2926.
- Carballa M., Omil F., Ternes T., Lema J. 2007: Fate of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) during anaerobic digestion of sewage sludge. *Wat.Res.* 41(10), p. 2139–2150.
- Carballa M., Fink G., Omil F., Lema J., Ternes T. 2008: Determination of the solid–water distribution coefficient (Kd) for pharmaceuticals, estrogens and musk fragrances in digested sludge. *Wat.Res.* 42(1-2), p. 287–295.
- Centre Ecotox 2011: Propositions de critères de qualité en exposition aiguë et chronique pour une série de substances pertinentes pour la Suisse. Centre suisse d'écotoxicologie appliquée, Eawag-EPFL. www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/vorschlaege/index_FR (10.11.2011).
- Chang C., Hsieh Y., Cheng K., Hsieh L., Cheng T., Yao K. 2008: Effect of pH on Fenton process using estimation of hydroxyl radical with salicylic acid as trapping reagent. *Wat.Sci.Techn.* 58(4), p. 873–879.
- Chon K., Sarp S., Lee S., Lee J., Lopez-Ramirez J., Cho J. 2011: Evaluation of a membrane bioreactor and nanofiltration for municipal wastewater reclamation: Trace contaminant control and fouling mitigation. *Desalination* 264(3), p. 201–205.
- CIPR 2010a: Rapport d'évaluation sur les médicaments à usage humain. N° 182. Commission internationale pour la protection du Rhin, Coblenze.
- CIPR 2010b: Rapport d'évaluation sur les biocides et les produits anticorrosifs. N° 183. Commission internationale pour la protection du Rhin, Coblenze.
- CIPR 2011a: Rapport d'évaluation sur les œstrogènes. N° 186. Commission internationale pour la protection du Rhin, Coblenze.
- CIPR 2011b: Rapport d'évaluation sur les agents de contraste radiographiques. N° 187. Commission internationale pour la protection du Rhin, Coblenze.
- CIPR 2011c: www.iksr.org/index.php?id=20 (10.11.2011).
- Cirja M., Ivashechkin P., Schäffer A., Corvini p. 2008: Factors affecting the removal of organic micropollutants from wastewater in conventional treatment plants (CTP) and membrane bioreactors (MBR). *Rev.Environ.Sci.Biotechn.* 7, p. 61–78.
- Clara M., Strenn B., Gans O., Martinez E., Kreuzinger N., Kroiss H. 2005: Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. *Wat.Res.* 39, p. 4797–4807.
- Clara M, Kreuzinger N., Strenn B., Gans O., Kroiss H. 2005: The solids retention time—a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Wat Res.* 39(1), p. 97–106.
- Clifford M., Eder K., Werner I., Hedrick p. 2005: Synergistic effects of esfenvalerate and infectious hematopoietic necrosis virus on juvenile chinook salmon mortality. *Env.Toxicol.Chem.* 24(7), p. 1766–1772.
- Comerton A., Andrews R., Bagley D., Hao C. 2008: The rejection of endocrine disrupting and pharmaceutically active compounds by NF and RO membranes as a function of compound and water matrix properties. *Journal of Membrane Sciences* 313, p. 323–335.
- Conkle J., White J., Metcalfe C. 2008: Reduction of pharmaceutically active compounds by a lagoon wetland wastewater treatment system in Southeast Louisiana. *Chemosphere* 73, p. 1741–1748.
- Corvini F., Shahgaldian p. 2010: LANCE: Laccase-nanoparticle conjugates for the elimination of micropollutants (endocrine disrupting chemicals) from wastewater in bioreactors. *Rev.Environ.Sci.Biotechn.* 9, p. 23–27.
- Corwin C., Summers R. 2011: Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbers after intermittent loading and throughout backwash cycles. *Wat.Res.* 45(2), p. 417–426.
- DCE: Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive-cadre sur l'eau).
- DETEC 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). Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Berne.
- DeWever H., Weiss S., Reemtsma T., Vereecken J., Müller J., Knepper T., Rörden O., Gonzalez S., Barcelo D., Hernando M. 2007: Comparison of sulfonated and other micropollutants removal in membrane bioreactor and conventional wastewater treatment. *Wat.Res.* 41, p. 935–945.
- DWA 2010: Aktivkohle in der Abwasserreinigung – Vom Versuch zum technischen Massstab. Tagungsband 23./24. Juni 2010, Mannheim.

- Ecoplan und BG 2011: Finanzierung der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser – Auslegeordnung und Vertiefung einzelner Finanzierungsvarianten. Schlussbericht. Ecoplan und BG.
- Enxing K., Grünebaum T., Lorenz G., Thöle D. 2011: Betriebserfahrungen mit der weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser auf der Kläranlage Schwerte. 23. Hamburger Kolloquium zur Abwasserwirtschaft.
- Esser-Schmittmann W., Schmitz S. 2008: Abwasserreinigung mit regenerierten Aktivkohlen – Ein ökonomisch interessanter Beitrag zum ganzheitlichen Umweltschutz. Vortrag 10.10.2008, VDI-Wissensforum, München.
- European Commission 2010: TGD for EQS, Chemicals and the water framework directive: Technical guidance for deriving environmental quality standards: Draft 2010, Draft Version 6.0, 23.2.2010.
- Farré M., Reungoat J., Argaud F., Rattier M., Keller J., Gernjak W. 2011: Fate of N-nitrosodimethylamine, trihalomethane and haloacetic acid precursors in tertiary treatment including biofiltration. *Wat.Res.* 45(17), p. 5695–5704.
- Fenner K., Kern S., Neuwöhner J., Hollender J., Singer H., Schärer M., Muralt R., Reinhardt M., Escher B. 2011: Transformationsprodukte von organischen Mikroverunreinigungen – Untersuchung von Auftreten und Wirkung im Gewässer. *Gas, Wasser, Abwasser* 5/2011, p. 335–345.
- Ferriman A. 2007: BMJ readers choose the «sanitary revolution» as greatest medical advance since 1840. *British Medical Journal* 334(111), p. 2.
- Flöser V., Beier S. 2010: Vorbehandlung von Krankenhausabwasser – unnötig, wünschenswert oder erforderlich? *Aachener Schriften zur Siedlungsentwässerung*, Band 14, Aachen.
- FTT 2011: Persönliche Mitteilung, Ferrate Treatment Technologies www.ferratetreatment.com (10.11.2011).
- Gälli R., Ort C., Schärer M. 2009: Micropolluants dans les eaux. Evaluation et réduction de la charge polluante des eaux usées urbaines. *Connaissance de l'environnement n° 0917*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Gerstmeier R., Romig T. 1998: Die Süßwasserfische Europas: für Naturfreunde und Angler. Kosmos. ISBN 9783440070680.
- Göbel A., Thomsen A., McArdell C., Joss A., Giger W. 2005: Occurrence and Sorption Behavior of Sulfonamides, Macrolides, and Trimethoprim in Activated Sludge Treatment. *Env.Sci.Techn.* 39, p. 3981–3989.
- Göbel A., McArdell C., Joss A., Siegrist H., Giger W. 2007: Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. *Sci.Tot.Env.* 372, p. 361–371.
- Gomez M., Martinez Bueno M., Lacorte S., Fernandez-Alba A., Agüera A. 2007: Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast. *Chemosphere* 66, p. 993–1002.
- Gonzalez S., Petrovic M., Barcelo D. 2008: Evaluation of two pilot scale membrane bioreactors for the elimination of selected surfactants from municipal wastewaters. *Journal of Hydrology* 356, p. 46–55.
- Götz C., Abegglen C., McArdell C., Koller M., Siegrist H., Hollender J., Schärer M. 2010a: Mikroverunreinigungen – Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatormoleküle. *Gas, Wasser, Abwasser* 4/2010, p. 325–333.
- Götz C., Kase R., Hollender J. 2010b: Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. *Eawag und Ökotoxizentrum. Studie im Auftrag des BAFU*.
- Gujer W. 2002: *Siedlungswasserwirtschaft*. ISBN 3-540-43404-6. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York.
- Hamers T., Kamstra J., Sonneveld E., Murk A., Kester M., Andersson P., Legler J., Brouwer A. 2006: In vitro profiling of the endocrine-disrupting potency of brominated flame retardants. *Toxicol.Sci.* 92, p. 157–173.
- Hanke I., Singer H., McArdell C., Brennwald M., Traber D., Muralt R., Herold T., Oechslin R., Kipfer R. 2007: Arzneimittel und Pestizide im Grundwasser. *Gas, Wasser, Abwasser* 3/2007, p. 187–196.
- Heckmann L., Callaghan A., Hooper H., Connon R., Hutchinson T., Maund S., Sibly R. 2007: Chronic toxicity of ibuprofen to *Daphnia magna*: Effects on life history traits and population dynamics. *Toxicology Letters* 172, p. 137–145.
- Heidler J., Halden R. 2008: Meta-Analysis of Mass Balances Examining Chemical Fate during Wastewater Treatment. *Env.Sci.Techn.* 42(17), p. 6324–6332.
- Hermann L. 2009: Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung. Eine Bestandesaufnahme. *Résumé en français. Connaissance de l'environnement n° 0929*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Hijosa-Valsero M., Matamoros V., Martin-Villacorta J., Becares E., Bayona J. 2010: Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Wat.Res.* 44(5), p. 1429–1439.
- Hoeger B., Köllner B., Dietrich D., Hitzfeld B. 2005: Water-borne diclofenac affects kidney and gill integrity and selected immune parameters in brown trout (*Salmo trutta f. fario*). *Aquatic Toxicology* 75, p. 53–64.
- Hollender J., Zimmermann S., Koepke S., Krauss M., McArdell C., Ort C., Singer H., von Gunten U., Siegrist H. 2009: Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded

with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. *Environmental Science and Technology* 43(20), p. 7862–7869.

Huber M., Göbel A., Joss A., Hermann N., Löffler D., McArdell C., Ried A., Siegrist H., Ternes T., von Gunten U. 2005: Oxidation of Pharmaceuticals during Ozonation of Municipal Wastewater Effluents: A Pilot Study. *Env.Sci.Techn.* 39, p. 4290–4299.

Hunziker AG 2006: Projekt «Micropoll» – Evaluation von Verfahren zur weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen auf kommunalen ARA. Literaturstudie, Gebrüder Hunziker AG, Winterthur.

Hunziker-Betatech 2008: Massnahmen in ARA zur weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen – Kostenstudie. Studie im Auftrag des BAFU.

Hürlimann J., Niederhauser p. 2007: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Diatomées Niveau R (région). L'environnement pratique n° 0740. Office fédéral de l'environnement, Berne.

Imfeld G., Braeckevelt M., Kusch P., Richnow H. 2009. Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands. *Chemosphere* 74, p. 349–362.

ISA 2011: Fachgespräch «Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen». Vorträge zur Tagung vom 12. April 2011 in Düsseldorf. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen. www.micropollutants.net (10.11.2011).

Jacob M., Guigui C., Cabassud C., Darras H., Lavison G., Moulin L. 2010 : Performances of RO and NF processes for wastewater reuse: Tertiary treatment after a conventional activated sludge or a membrane bioreactor. *Desalination* 250, p. 833–839.

Jelic A., Gros M., Ginebrada A., Cespedes-Sanchez R., Ventura F., Petrovic M., Barcelo D. 2011: Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Wat.Res.* 45, p. 1165–1176.

Jiang J., Lloyd B. 2002: Progress in the development and use of ferrate(VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment. *Wat.Res.* 36, p. 1397–1408.

Jiang J., Wang S., Papangoulopoulos A. 2006: The role of potassium ferrate(VI) in the inactivation of *Escherichia coli* and in the reduction of COD for water remediation. *Desalination* 210(1-3), p. 266–273.

Joss A., Alder A., Huber M., Göbel A., von Gunten U., Keller E., McArdell C., Ternes T., Siegrist H.: Abbau von Mikroverunreinigungen in der kommunalen Abwasserreinigung. VSA-Fortbildungskurs 2004.

Joss A., Keller E., Alder A., Göbel A., McArdell C., Ternes T., Siegrist H. 2005: Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. *Wat.Res.* 39(14), p. 3139–3152.

Joss A., Maurer M. 2005: Les biofiltres au banc d'essai. *Eawag-News* 60/2005, p. 24–27.

Joss A., Baenninger C., Foa P., Koepke S., Krauss M., McArdell C., Rottermann K., Wei Y., Zapata A., Siegrist H. 2011: Water reuse: >90% water yield in MBR/RO through concentrate recycling and CO₂ addition as scaling control. *Wat.Res.* 45(18), p. 6141–6151.

Kasprzyk-Hordern B., Dinsdale R., Guwy A. 2009: The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. *Wat.Res.* 43, p. 363–380.

Katsoyiannis I., Canonica S., von Gunten U. 2011: Efficiency and energy requirements for the transformation of organic micropollutants by ozone, O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂. *Wat.Res.* 45(13), p. 3811–3822.

Kazner C., Wintgens T., Ternes T., Melin T. 2006: Elimination von Industriechemikalien und Pharmazeutika durch Nanofiltration und Adsorption an Aktivkohle. DWA Industrietag 2009.

Kazner C., Lehnberg K., Kovalova L., Wintgens T., Melin T., Hollender J., Dott W. 2008: Removal of endocrine disruptors and cytostatics from effluent by nanofiltration in combination with adsorption on powdered activated carbon. *Wat.Sci.Techn.* 58(8), p. 1699–1706.

Kazner C., Meier J., Wintgens T., Melin T. 2009: Capillary nanofiltration coupled with powdered activated carbon adsorption for high quality water reuse. *Wat.Sci.Techn.* 60(1), p. 251–259.

Keusen M., Schärer M., Sieber U. 2010: Einflussfaktoren auf die Gewässerqualität – Eine räumliche Betrachtung. *Gas, Wasser, Abwasser* 11/2010.

Khunjar W., Mackintosh S., Skotnicka-Pitak J., Baik S., Aga D., Love N. 2011: Elucidating the Relative Roles of Ammonia Oxidizing and Heterotrophic Bacteria during the Biotransformation of 7-Ethinylestradiol and Trimethoprim. *Env.Sci.Techn.* 45, p. 3605–3612.

Kidd K.A., Blanchfield P.J., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M., Flick R.W. 2007: Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 104(21), p. 8897–8901.

Kienle C., Kase R., Werner I. 2011: Evaluation of Bioassays and Wastewater Quality: In vitro and in vivo Bioassays for the Performance Review in the Project «Strategy Micropoll». Ökotoxzentrum, Dübendorf.

Kim I., Yamashita N., Tanaka H. 2009: Performance of UV and UV/H₂O₂ processes for the removal of pharmaceuticals detected in secondary effluent of a sewage treatment plant in Japan. *Journal of Hazardous Materials* 166, p. 1134–1140.

Kimura K., Hara H., Watanabe Y. 2007. Elimination of Selected Acidic Pharmaceuticals from Municipal Wastewater by an Activated Sludge System and Membrane Bioreactors. *Env.Sci.Techn.* 41, p. 3708–3714.

- Kimura K., Iwase T., Kita S., Watanabe Y. 2009: Influence of residual organic macromolecules produced in biological wastewater treatment processes on removal of pharmaceuticals by NF/RO membranes. *Wat.Res.* 43, p. 3751–3758.
- Kind E., Levy G.-A. 2012: Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA. Studie im Auftrag des BAFU. Holinger AG, Baden.
- KKWG 2008: Kernkraftwerk Gösgen – Technik und Betrieb. Kernkraftwerk Gösgen AG, www.kkg.ch/upload/cms/user/KKG_Broschre_D_2010.pdf (10.11.2011).
- Klavarioti M., Mantzavinos D., Kassinos D. 2009: Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International* 35, p. 402–417.
- Klöpffel A., Frimmel 2009: Einflussfaktoren auf den Rückhalt polarer organischer Mikroverunreinigungen bei der Nanofiltration. *Vom Wasser* 108(1), p. 19–24.
- Kosutic K., Dolar D., Asperger D., Kunst B. 2007: Removal of antibiotics from a model wastewater by RO/NF membranes. *Separation and Purification Technology* 53, p. 244–249.
- Kreuzinger N., Clara M., Strenn B., Kroiss H. 2004: Relevance of the sludge retention time (SRT) as design criteria for wastewater treatment plants for the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals from wastewater. *Wat.Sci.Techn.* 50(5), p. 149–156.
- Larsen H., Hansen P., Boyer-Souchet F. 2010: Decision support guideline based on LCA and cost/efficiency assessment. EU-Project NEPTUNE, Deliverable 4.3.
- Lausanne (Ed.) 2011: Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Aide à la conception des ouvrages. Ed. Ville de Lausanne. www.lausanne.ch/micropolluants (10.11.2011).
- LEaux: Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux, état au 1.1.2011. RS 814.20.
- Lee Y., Cho M., Kim J., Yoon J. 2004: Chemistry of ferrate (Fe(VI)) in aqueous solution and its application as a green chemical. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 10, p. 161–171.
- Lee Y., Zimmermann S., Kieu A., von Gunten U. 2009: Ferrate (Fe(VI)) Application for Municipal Wastewater Treatment: A Novel Process for Simultaneous Micropollutant Oxidation and Phosphate Removal. *Env.Sci.Techn.* 43, p. 3831–3838.
- Lee Y., von Gunten U. 2010: Oxidative transformation of micropollutants during municipal wastewater treatment: Comparison of kinetic aspects of selective (chlorine, chlorine dioxide, ferrateVI, and ozone) and non-selective oxidants (hydroxyl radical). *Wat. Res.* 44, p. 555–566.
- Legler J., Brouwer A. 2003: Are brominated flame retardants endocrine disruptors? *Env.Int.* 29, p. 879–885.
- Lesjean B., Gnirss R., Buisson H., Keller S., Tazi-Pain A., Luck F. 2005: Outcomes of a 2-year investigation on enhanced biological nutrients removal and trace organics elimination in membrane bioreactor (MBR). *Wat.Sci.Techn.* 52(10-11), p. 453–460.
- Liess M., Von Der Ohe p. 2005: Analyzing effects of pesticides on invertebrate communities in streams. *Env.Tox.Chem.* 24, p. 954–965.
- Liikanen R., Yli-Kuivila J., Tenhunen J., Laukkanen R. 2006: Cost and environmental impact of nanofiltration in treating chemically pre-treated surface water. *Desalination* 201, p. 58–70.
- Lindberg R., Wennberg P., Johansson M., Tysklind M., Andersson B. 2005: Screening of Human Antibiotic Substances and Determination of Weekly Mass Flows in Five Sewage Treatment Plants in Sweden. *Env.Sci.Techn.* 39(10), p. 3421–3429.
- Magnet A. 2011: Communication personnelle.
- Margot J., Magnet A., Thonney D., Chèvre N., de Alencastro F., Rossi L. 2011: Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne.
- Matamoras V., Arias C., Brix H., Bayona J. 2007: Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) from Urban Wastewater in a Pilot Vertical Flow Constructed Wetland and a Sand Filter. *Env.Sci.Techn.* 41, p. 8171–8177.
- Maurer M., Herlyn A. 2006: Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Schlussbericht, Eawag.
- Maurer M., Escher B., Richle P., Schaffner C., Alder A. 2007: Elimination of β -blockers in sewage treatment plants. *Wat.Res.* 41, p. 1614–1622.
- McArdell C., Kovalova L., Siegrist H., Kienle C., Moser R., Schwartz T. 2011: Input and Elimination of Pharmaceuticals and Disinfectants from Hospital Wastewater. Final Report. Eawag.
- Menzel U. 1997: Optimierter Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination organischer Reststoffe aus Kläranlagenabläufen. Dissertation. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 143.
- Metcalf und Eddy 2003: *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*. Fourth Edition 2003, McGraw Hill, New York.
- Metzger S., Kapp H. 2009: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen. VSA-Verbandsbericht 586.
- Metzger S. 2010: Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. Oldenburg Industrieverlag.
- Miller D., Lobo W. 2008: How to lower your ozone system operating costs by over 70% – An introduction to Short Loop Recycle (SLR) technology. *Ozone News* 36(6), p. 15–19.

- Mišík M., Knasmueller S., Ferk F., Cichna-Markl M., Grummt T., Schaar H., Kreuzinger N. 2011: Impact of ozonation on the genotoxic activity of tertiary treated municipal wastewater. *Wat.Res.* 45, p. 3681–3691.
- Munoz-Ortiz I. 2006: Life Cycle Assessment as a Tool for Green Chemistry: Application to different advanced oxidation processes for wastewater treatment. Universidad Autonoma de Barcelona, Tesi Doctoral.
- MUNV 2010: Antrag der Abg. Dr. Gisela Splett und Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr: Spurenstoffe im Abwasser entfernen. Landtag Baden/Württemberg, Drucksache 14/6229.
- Naddeo V., MERIC S., Kassinos D., Belgiorno V., Guida M. 2009: Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation. *Wat.Res.* 43, p. 4019–4027.
- Nakada N., Shinohara H., Murata A., Kiri K., Managaki S., Sato N., Takada H. 2007: Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment. *Wat.Res.* 40(17), p. 3297–3303.
- Nanaboina V., Korshin G. 2010: Evolution of absorbance spectra of ozonated wastewater and its relationship with the degradation of trace-level organic species. *Env.Sci.Techn.* 44, p. 6130–6137.
- NEPTUNE 2010: New sustainable concepts and processes for optimization and upgrading municipal wastewater and sludge treatment. Final Activity Report. EU-Project, Contract No. 036845.
- Norme NF EN 12903: Produits utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine – Charbon actif en poudre.
- OChim: Ordonnance du 18 mai 2005 sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (Ordonnance sur les produits chimiques), état au 1.12.2010. SR 813.11.
- OEaux: Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux, état au 1.8.2011. RS 814.201.
- OFEN 2010a: Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse 2010. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- OFEN 2010b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2009. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- OFEN 2008: Consommation énergétique en fonction de l'application 2000–2006. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- OFEV 2006: Adresses des stations d'épuration en Suisse avec mention de leur capacité. Etat 12.10.2006. www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01295/01296/01298/index.html?lang=fr (10.11.2011).
- OFEV 2008: Quelle quantité de CO2 est générée par la combustion de...? www.bafu.admin.ch/klima/09608/index.html?lang=fr.
- OFEV 2010: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2008. National Inventory Report 2010. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- OFEV 2011: Truite (*Salmo trutta*). www.bafu.admin.ch/tiere/09262/09403/index.html?lang=fr (10.11.2011).
- Okuda T., Kobayashi Y., Nagao R., Yamashita N., Tanaka H., Tanaka S., Fujii S., Konishi C., Houwa I. 2008: Removal efficiency of 66 pharmaceuticals during wastewater treatment process in Japan. *Wat.Sci.Techn.* 57(1), p. 65–71.
- Onesios K., Yu J., Bouwer E. 2009: Biodegradation and removal of pharmaceuticals and personal care products in treatment systems: a review. *Biodegradation* 20, p. 441–466.
- OPBio: Ordonnance du 18 mai 2005 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides (Ordonnance sur les produits biocides), état au 15.10.2011, RS 813.12.
- OPPh: Ordonnance du 12 mai 2010 sur la mise en circulation des produits phytosanitaires (Ordonnance sur les produits phytosanitaires), état au 1.7. 2011, RS 916.161.
- ORRChim: Ordonnance du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques), état au 1.8.2011, RS 814.81.
- Ort C., Siegrist H., Hosbach H., Morf L., Scheringer M., Studer C. 2007: Mikroverunreinigungen – Nationales Stoffflussmodell. Gas, Wasser, Abwasser 11/2007, p. 853–859.
- Ort C., Hollender J., Schärer M., Siegrist H. 2009: Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. *Environ. Sci. Technol.* 43, p. 3214–3220.
- Park N., Vanderford B., Snyder S., Sarp S., Kim S., Cho J. 2009: Effective controls of micropollutants included in wastewater effluent using constructed wetlands under anoxic condition. *Ecological Engineering* 35, p. 418–423.
- Parlement européen 2007: Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n° 793/93 du Conseil et le règlement (CE) n° 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission: p. 278.
- Parsons S. (Hrsg.) 2004: Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. IWA Publishing, London.
- Patel M. 2009: Membrane technology takes reclamation to the limit. AWWA Membrane Technology Conference & Exhibition, 15–18 März 2009.

- Petala M., Samaras P., Zouboulis A., Kungolos A., Sakellaropoulos G. 2006: Ecotoxicological properties of wastewater treated using tertiary methods. *Env.Toxicol.* 21, p. 417–424.
- Peter A., von Gunten U. 2008: Elimination des composés traces organiques. *Eawag News* 65/2008, p. 24–27.
- Peter M. 2009: Valeur de remplacement de l'infrastructure environnementale (Résumé). *Connaissance de l'environnement n° 0920*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Pinnekamp J., Merkel W. (Hrsg.) 2008: Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen – Güte- und Kostenbetrachtungen (Abschlussberichte im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Aachen.
- Pinnekamp J., Beier S., Cramer C., Schröder H., Mauer C., Selke D. 2009: Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl. Abschlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Aachen.
- PNR50 2008: Plateforme de consensus « Perturbateurs endocriniens dans les eaux usées et dans le milieu aquatique » Document final. Programme national de recherche 50 « Perturbateurs endocriniens ». Fonds national suisse.
- PNR64 2011: Opportunités et risques des nanomatériaux. Programme national de recherche 64. Fonds national suisse. www.nfp64.ch (10.11.2011).
- POSEIDON 2004: Assessment of technologies for the removal of pharmaceuticals and personal care products in sewage and drinking water facilities to improve the indirect potable water reuse. Final report.
- Radjenovic J., Petrovic M., Barcelo D. 2007: Analysis of pharmaceuticals in wastewater and removal using a membrane bioreactor. *Anal.Bioanal.Chem.* 387, p. 1365–1377.
- Ratte M., Ratte H. 2009: Beurteilung des Effektes von Abwasserbehandlung mittels Ozonung anhand von Toxizitätsparametern aus in vitro- und in vivo-Biotests. Daten aus Projekt «MicroPoll» (Ozonung von gereinigtem Abwasser), Pilotversuch Regensdorf, Teil: «Effektbasierte Testsysteme mit Aufkonzentrierung» und «Standardisierte Testverfahren».
- Reif R., Suarez S., Omil F., Lema J. 2008: Fate of pharmaceuticals and cosmetic ingredients during the operation of a MBR treating sewage. *Desalination* 221, p. 511–517.
- Reinhardt M., Tremp J., Zoller O., Rupp H., Hoehn E. 2010: Perfluorierte Chemikalien im Grundwasser – Grundlagen und Pilotstudie Schweiz. *Gas, Wasser, Abwasser* 11/2010, p. 967–978.
- Reungoat J., Macova M., Escher B., Carswell S., Mueller J., Keller J. 2010: Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration. *Wat.Res.* 44(2), p. 477–492.
- Reungoat J., Escher B., Macova M., Keller J. 2011: Biofiltration of wastewater treatment plant effluent: Effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity. *Wat.Res.* 45, p. 2751–2762.
- Rieckermann J. 2006: Quantification of Exfiltration from Sewers with Tracers. *Diss ETH No.* 16158.
- Ried A., Mielcke J., Wieland A. 2009: The potential use of ozone in municipal wastewater. *Ozone: Science and Engineering* 31, p. 415–421.
- Roberts P., Stumm W. 1974: Behandlung von kommunalem Abwasser mit Aktivkohle. *VSA-Verbandsbericht* 118/3, *Gas, Wasser, Abwasser* 54(3), p. 78–88.
- Roberts P., Gujer W., Eugster J. 1977: Reinigung von kommunalem Abwasser mittels Aktivkohle nach schwach belasteter biologischer Reinigung und Filtration. *Vom Wasser*, Band 48. Verlag Chemie GmbH, Weinheim.
- Rosario-Ortiz F., Wert E., Snyder S. 2010: Evaluation of UV/H2O2 treatment for the oxidation of pharmaceuticals in wastewater. *Wat.Res.* 44, p. 1440–1448.
- Roorda J., Wortel N., van Dalen R. 2005: New process for treatment of organically fouled water: experiences with WWTP effluent. *Desalination* 178, p. 141–148.
- Rössler A. 2010: Optimierung der Abtrennung von Pulveraktivkohle. *DWA-Tagungsband «Aktivkohle in der Abwasserreinigung»*, 23.Juni 2010, Mannheim, p. 75–90.
- Sahar E., Messalem R., Cikurel H., Aharoni A., Brenner A., Godehard M., Jekel M., Ernst M. 2011: Fate of antibiotics in activated sludge followed by ultrafiltration (CAS-UF) and in a membrane bioreactor (MBR). *Wat.Res.* 45(16), p. 4827–4836.
- Santos J., Aparicio I., Alonso E. 2007: Occurrence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater treatment plants. A case study: Seville city (Spain). *Env.Int.* 33, p. 596–601.
- Schaar H., Kreuzinger N. 2011: KomOzon – Technische Umsetzung und Implementierung einer Ozonungsstufe für nach dem Stand der Technik gereinigtes kommunales Abwasser. Heranführung an den Stand der Technik. *Lebensministerium*, Wien.
- Schaefer A., Fane A., Waite T. (Hrsg.) 2005. *Nanofiltration – Principles and Application*. Elsevier, Oxford. ISBN 978-1856174053.
- Schärer M., Sieber U., Müller S. 2010: Weitere Massnahmen gegen Mikroverunreinigungen – Situation in der Schweiz. *gwa* 7/2011, 563–568.

- Schlupe M., Thomann M., Häner A., Gälli R. 2006: Micropolluants organiques et substances nutritives (Résumé). *Connaissance de l'environnement n° 0614*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Scholz N., Truelove N., Labenia J., Baldwin D., Collier T. 2006: Dose-additive inhibition of chinook salmon acetylcholinesterase activity by mixtures of organophosphate and carbamate insecticides. *Env.Toxicol.Chem.* 25(5), p. 1200–1207.
- Schrader C., Krampe J., Rott U., Kuch B., Metzger J.W. 2006: Untersuchungen und Optimierung der Abwasserreinigung zur Eliminierung von organischen Spurenstoffen unter verfahrenstechnischen und ökonomischen Aspekten. Abschlussbericht Modul 3 und 4. Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft.
- Schrader G. 2006: Direct nanofiltration of wastewater treatment plant effluent. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- Schulz M., Löffler D., Wagner M., Ternes T. 2008: Transformation of the X-ray Contrast Medium Iopromide In Soil and Biological Wastewater Treatment. *Env.Sci.Techn.* 42(19), p. 7207–7217.
- SDR: Ordonnance du 29 novembre 2002 relative au transport des marchandises dangereuses par route, état au 1.1.2011. RS 741.621.
- Siegrist H., Joss A., Alder A., McArdell C., Göbel A., Keller E., Ternes T. 2003: Micropolluants – Le traitement des eaux usées face à un nouveau défi ? *Eawag-News* 57/2003, p. 7–10.
- Siegrist H., Joss A. 2004: Mikro- und Ultrafiltration. Skript zur Vorlesung «Physikalisch-chemische Verfahren», ETH Zürich.
- Singer H., Huntscha S., Hollender J., Mazacek J. 2009: Multikomponenten-Screening für den Rhein bei Basel. Abschlussbericht. Eawag, Dübendorf.
- Sontheimer H., Frick B., Fettig J., Hörner G., Hubele C., Zimmer G. 1985: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DGVW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Sponberg A., Witter J. 2008: Pharmaceutical compounds in the wastewater process stream in Northwest Ohio. *Sci.Tot.Env.* 397, p. 148–157.
- Stalter D., Magdeburg A., Oehlmann J. 2010a: Comparative toxicity assessment of ozone and activated carbon treated sewage effluents using an in vivo test battery. *Wat.Res.* 44(8), p. 2610–2620.
- Stalter D., Magdeburg A., Weil M., Knacker T., Oehlmann J. 2010b: Toxication or detoxication? In vivo toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow trout. *Wat.Res.* 44, p. 439–448.
- Stalter D., Magdeburg A., Wagner M., Oehlmann J. 2011: Ozonation and activated carbon treatment of sewage effluents: Removal of endocrine activity and cytotoxicity. *Wat.Res.* 45, p. 1015–1024.
- Sterkele B., Gujer W. 2008: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser. 1. Zwischenbericht. Eawag, Dübendorf.
- Sterkele B., Gujer W. 2009: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser. 2. Zwischenbericht. Eawag, Dübendorf.
- STOWA 2010: Actievekoofiltratie op afloop nabezinktank. STOWA Report Nr. 27/2010, Amersfoort. ISBN 978-90-5773-497-7.
- Stucki p. 2010: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Macrozoobenthos – niveau R (région) . *L'environnement pratique n° 1026*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Sumpter J. 2005: Endocrine disrupters in the aquatic environment: An overview. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* 33, p. 9–16.
- Suter J.M.F., Holm p. 2004: Fischnetz. Sur la trace du déclin piscicole. Rapport final. EAWAG, OFEFP, Cantons, SGCI, SFV, FIWI, Uni Basel. www.fischnetz.ch.
- SUVA 2011: Valeurs limites d'exposition aux postes de travail. Référence 1903.f www.suva.ch/waswo.
- Takanashi H, Mayumi M, Kato M, Hirata M, Hano T, 2002. Removal of mutagen precursor from wastewater by activated sludge and oxidation treatment. *Wat.Sci.Techn.* 46(11-12), p. 389–394.
- Ternes T. 1998: Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Wat.Res.* 32(11), p. 3245–3260.
- Ternes T., Kreckel P., Mueller J. 1999: Behaviour and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants–II. Aerobic batch experiments with activated sludge. *Sci.Total Environ* 225, p. 91–99.
- Ternes T., Joss A. 2006: Human pharmaceuticals, Hormones and Fragrances – The challenge of micropollutants in urban water management. IWA publishing, London – New York.
- Ternes T., Bonerz M., Herrmann N., Teiser B., Andersen H. 2007: Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances. *Chemosphere* 66, p. 894–904.
- TU Dortmund 2008: Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. Phase 3, Abschlussbericht. Technische Universität Dortmund, Fakultät Chemie- und Bioingenieurwesen, Lehrstuhl Umwelttechnik.
- TZW 2006: Vorkommen und Bewertung von Arzneimittelrückständen in Rhein und Main, Antibiotikaresistenzen in der Umwelt – Ursachen, Nachweis, Verbreitung. Schriftenreihe Band 29, Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe.
- Van der Bruggen B., Mänttari M., Nyström M. 2008: Drawbacks of applying nanofiltration and how to avoid them: A review. *Separation and Purification Technology* 63, p. 251–263.

- Van Houtte E., Verbauwheide J. 2007: Torreele's water re-use facility enabled sustainable groundwater management in de Flemish dunes (Belgium). *Water Practice and Technology* 3(2), p. 1–11.
- Vermeirssen E., Burki R., Joris C., Peter A., Segner H., Suter M., Burkhardt-Holm p. 2005: Characterization of the estrogenicity of Swiss midland rivers using a recombinant yeast bioassay and plasma vitellogenin concentrations in feral male brown trout. *Env.Tox.Chem.* 24, p. 2226–2233.
- Vieno N., Tuhkanen T., Kronberg L. 2007. Elimination of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Finland. *Wat.Res.* 41, p. 1001–1012.
- Vogna D., Marotta R., Andreozzi R., Napolitano A., d'Ischia M. 2004: Kinetic and chemical assessment of the UV/H₂O₂ treatment of antiepileptic drug carbamazepine. *Chemosphere* 54(4), p. 497–505.
- Von Gunten U., Oliveras Y. 1998: Advanced oxidation of bromide-containing waters: bromate formation mechanisms. *Env.Sci.Techn.* 32(1), p. 63–70.
- Von Gunten U. 2003a: Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Wat.Res.* 37(7), p.1443–1467.
- Von Gunten U. 2003b: Ozonation of drinking water: Part II: Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Wat.Res.* 37(7), p. 1469–1487.
- VSA, ORED 2006: Définition et standardisation d'indicateurs pour l'assainissement – Recommandation. Association suisse des professionnels de la protection des eaux .
- VSA, suisseénergie 2010: Energie dans les STEP – Guide de l'optimisation énergétique des stations d'épuration des eaux usées. Association suisse des professionnels de la protection des eaux / suisseénergie.
- VSA, IC 2011: Coûts et prestations de l'assainissement – Enquête 2011. Association suisse des professionnels de la protection des eaux Zurich/ Infrastructures communales, Berne.
- Wahlberg C., Björnelius B., Paxéus N. 2010: Läkemedelsrester i Stockholms vattenmiljö – Förekomst, förebyggande åtgärder och rening av avloppsvatten. Stockholm Vatten AB, Stockholm. ISBN 978-91-633-6642-0.
- Watkinson A., Murby E., Costanzo S. 2007: Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: Implications for environmental discharge and wastewater recycling. *Wat.Res.* 41, p. 4164–4176.
- Weiss S., Reemtsma T. 2008: Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment – A viable option to reduce the amount of polar pollutants discharged into surface waters? *Wat.Res.* 42, p. 3837–3847.
- Wick A., Fink G., Joss A., Siegrist H., Ternes T. 2008: Fate of beta blockers and psycho-active drugs in conventional wastewater treatment. *Wat.Res.* 43, p. 1060–1074.
- Wick A., Marincas O., Moldovan Z., Ternes T. 2011: Sorption of biocides, triazine and phenylurea herbicides, and UV-filters onto secondary sludge. *Wat.Res.* 45(12), p. 3638–3652.
- Wittmer I. 2010: Influence of agricultural pesticide and urban biocide use on load dynamics in surface waters. Diss ETH No. 19323.
- Wittmer I., Scheidegger R., Bader H., Singer H., Stamm C. 2011: Loss rates of urban biocides can exceed those of agricultural pesticides. *Sci. Total Environ.* 409(5), p. 920–932.
- Yangali-Quintanilla V., Sadmani A., McConville M., Kennedy M., Amy G. 2009: Rejection of pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting compounds by clean and fouled nanofiltration membranes. *Wat.Res.* 43, p. 2349–2362.
- Yangali-Quintanilla V. 2010: New process for treatment of organically fouled water: experiences with WWTP effluent. Dissertation, UNESCO-IHE, Delft University of Technology.
- Yoon Y., Westerhoff P., Snyder S., Wert E., Yoon J. 2007: Removal of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals by nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Desalination* 202, p. 16–23.
- Yu J., Bouwer E., Coelhan M. 2006: Occurrence and biodegradability studies of selected pharmaceuticals and personal care products in sewage effluent. *Agri.Wat.Man.* 86, p. 72–80.
- Zimmermann S., Wittenwiler M., Hollender J., Krauss M., Ort C., Siegrist H., von Gunten U. 2010: Kinetic assessment and modeling of an ozonation step for full-scale municipal wastewater treatment: Micropollutant oxidation, by-product formation and disinfection. *Wat.Res.* 45(2), p. 605–617.
- Zimmermann S., Lee Y., von Gunten U. 2010: La double action épuratrice des ferrates. *Eawag News* 68/2010, p. 22–24.
- Zimmermann S. 2011: Enhanced wastewater treatment by ozone and ferrate: Kinetics, transformation products and full-scale ozonation. Diss. ETH Nr. 19615.
- Zuehlke S., Duennbier U., Lesjean B., Gnirss R., Buisson H. 2006: Long-Term Comparison of Trace Organics Removal Performances Between Conventional and Membrane Activated Sludge Processes. *Wat.Env.Res.* 78, p. 2480–2486.
- Zwickenpflug B., Böhler M., Siegrist H., Gujer W., Behl M., Neuenschwander S., Joss A., Sterkele B., Dorusch F., Hollender J., Ternes T., Fink G. 2009: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. 3. Zwischenbericht. Eawag, Dübendorf.
- Zwickenpflug B., Böhler M., Sterkele B., Joss A., Siegrist H., Traber J., Gujer W., Behl M., Dorusch F., Hollender J. 2010, Ternes T., Fink G.: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Schlussbericht. Eawag, Dübendorf.

> Répertoires

Liste des abréviations

AMP

Adsorption modulée en pression (procédé utilisé pour produire de l'oxygène)

AOX

Composés organiques halogénés adsorbables (Adsorbable organic halogen)

BAC

Biological activated carbon (filtre à charbon actif biologiquement activé)

BVT

Bed volumes treated (→ glossaire)

CAG

Charbon actif en grains

CAP

Charbon actif en poudre

CAS

Coefficient d'absorption spectrale (voir glossaire)

CCE

Conférence des chefs des services et offices de protection de l'environnement de Suisse

CI

Chromatographie ionique

COD

Carbone organique dissous

COV

Composés organiques volatils

D50

Paramètre de distribution granulométrique (diamètre médian)

DCO

Demande chimique en oxygène

DF

Décanteur final

EBCT

Empty bed contact time

EBV

Empty bed volumes (→ glossaire, BVT)

EH

Equivalent-habitant

Eq. CO₂

Equivalent CO₂

FELST

Fish Early Life Stage Test

H

Habitant

H₂O₂

Peroxyde d'hydrogène

HAP

Hydrocarbure aromatique polycyclique

HDPE/PEHD

Polyéthylène haute densité

HPLC-MS/MS

High Performance Liquid Chromatography followed by tandem Mass Spectrometry. Chromatographie en phase liquide à haute performance, suivie d'une spectrométrie de masse en tandem. Méthode de mesure à haute résolution utilisée pour l'analyse des éléments traces.

IC

Indice de changement

LEaux

Loi sur la protection des eaux

MES

Substances non dissoutes total (matière en suspension → TSS)

MS

Matière sèche

NDMA

Nitrosodiméthylamine

NF

Nanofiltration

NQE

Norme de qualité environnementale

NQE-LT

Norme de qualité environnementale sur le long terme

O₂

Oxygène

O₃ Ozone	Fig. 4 Proportion d'eaux usées épurées dans les cours d'eau suisses	22
OEaux Ordonnance sur la protection des eaux	Fig. 5 Amélioration progressive de l'épuration des eaux durant ces dernières décennies	28
OH⁻, radical OH Hydroxy ou radical hydroxyle	Fig. 6 Filière typique d'épuration des eaux usées dans une STEP suisse	29
OI Osmose inverse	Fig. 7 Nombre de STEP par catégorie	31
POA Procédé d'oxydation avancée	Fig. 8 Habitants raccordés par catégorie	31
PTFE Polytétrafluoroéthylène (Téflon)	Fig. 9 Elimination des micropolluants dans les STEP actuelles	35
RBS Réacteur biologique séquentiel	Fig. 10 Schéma classique d'une installation d'ozonation	40
STEP Station d'épuration	Fig. 11 Schéma du traitement au charbon actif en grains	41
TEQ Toxic equivalent quantity (équivalent toxique)	Fig. 12 Schéma du traitement au charbon actif en poudre	41
TMR Techniques de mesure et de régulation	Fig. 13 Exemple de fonctionnement d'une installation de nanofiltration	43
TSS Total suspended solids (→ MES)	Fig. 14 Schéma d'une installation d'oxydation avancée utilisant les UV et du H ₂ O ₂	44
UV Rayonnement ultraviolet	Fig. 15 Comparaison de la qualité des eaux du Furtbach en amont et en aval de la STEP, avant et après la mise en service de l'ozonation	50
VSA Association suisse des professionnels de la protection des eaux	Fig. 16 Amélioration de la qualité de l'eau dans les tronçons où la proportion d'eaux traitées est élevée	52
VSA Vacuum Swing Adsorption (→ AMP)	Fig. 17 Charges de quelques micropolluants dans le Rhin à la hauteur de Bâle	53
Figures	Fig. 18 Hausse de la consommation spécifique brute d'électricité engendrée par l'ozonation	54
Fig. 1 Sources et voies d'apport de micropolluants	Fig. 19 Capacité du traitement biologique, de l'adsorption sur CAP et de l'ozonation à éliminer les micropolluants	61
		21

Tableaux

Tab. 1	
Classement des STEP selon les étapes de traitement disponibles	30
Tab. 2	
Quelques paramètres de l'épuration des eaux usées en Suisse	32
Tab. 3	
Consommation énergétique et coûts spécifiques de l'épuration des eaux en fonction de la taille de la station d'épuration	32
Tab. 4	
Procédés supplémentaires envisageables pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines	37
Tab. 5	
Appréciation de la capacité de divers procédés à éliminer les micropolluants	38
Tab. 6	
Effet des étapes de traitement supplémentaires sur la consommation d'électricité et d'énergie primaire	56
Tab. 7	
Consommation d'énergie: données comparatives	56
Tab. 8	
Coût d'une étape supplémentaire de traitement en fonction de la taille de la STEP	58
Tab. 9	
Ozonation et adsorption sur CAP	62
Tab. 10	
Vorkommen der Schweizspezifischen Stoffe	66
Tab. 11	
Konzentrationen der untersuchten Stoffe in Regensdorf, Lausanne und an der Eawag	69
Tab. 12	
Durchschnittliche Elimination der verschiedenen Verfahrensstufen	71

> Glossaire

Adsorbant

Matériau solide à la surface duquel se fixent certaines molécules dissoutes

Adsorbat

Matériau qui se fixe à la surface du matériau → adsorbant

Aérobie, conditions aérobies

Présence d'oxygène

Age des boues

Durée moyenne de séjour des matières solides dans le bassin d'activation d'une STEP (AB = quantité de boues dans le système / soutirage des boues)

Anaérobie, conditions anaérobies

Absence d'oxygène et de nitrate

Anoxie, conditions anoxiques

Absence d'oxygène, présence de nitrate

Biocide

Substance active ou produit contenant une substance active destinée à éloigner, neutraliser, détruire ou combattre un organisme nuisible par voie chimique ou biologique, ou encore à prévenir les dommages causés par ces mêmes organismes. Les objets qui contiennent ou libèrent ce type de substances actives sont également considérés comme des produits biocides.

Biologie

Terme utilisé ici en lieu et place de Etape de traitement biologique

Boues activées

Biomasse (et composants anorganiques) en suspension dans la phase biologique d'épuration

Boues d'épuration

Boues stabilisées par digestion ou par un autre procédé en provenance d'une station d'épuration.

BVT = EBV

Bed volumes treated (ou empty bed volumes). Volume d'eaux traitées [m³] divisé par le volume du filtre [m³].

CAS

Coefficient d'absorption spectrale à une longueur d'onde de 254 nm

Composés traces organiques

Terme générique désignant une variété de substances organiques présentes à des concentrations très faibles. Ici synonyme de → micropolluants

Consommation brute d'électricité

Consommation de courant électrique d'une STEP (sans tenir compte de la production propre)

Consommation nette d'électricité

Courant électrique prélevé sur le réseau par une STEP (consommation brute – production propre)

CQC

Critère de qualité chronique – comparable à la → NQE LT

Dénitrification

Transformation microbologique des nitrates en azote élémentaire

Eaux mixtes

Eaux usées communales, eau de pluie comprise

Eaux usées communales

Eaux usées domestiques (eaux provenant des ménages ou équivalentes) et eaux de précipitation s'écoulant des surfaces bâties ou imperméabilisées et évacuées avec les eaux domestiques.

Energie primaire

Energie disponible dans la nature avant toute transformation.

Equivalent-habitant (EH)

Unité de mesure servant à quantifier la charge supportée par une STEP en termes de substances organiques, d'azote ou de phosphore. Outre les → habitants, il convient également de tenir compte des apports de l'industrie et de l'artisanat et des pendulaires.

Evacuation des eaux usées

Réseau d'égouts et épuration des eaux usées

Génotoxicité

Terme générique englobant une variété de dommages possibles à l'ADN.

Habitants

Nombre de personnes vivant dans une région donnée (Suisse, bassin versant d'une STEP, ...)

IC, indice de changement

Indice mesurant l'évolution relative de la toxicité au fil des étapes d'épuration (rapport entre la toxicité mesurée avant et après une étape d'épuration donnée)

Matières organiques

Composés chimiques dotés d'une structure carbonique (exceptions: carbonates, CO, CO₂, autres)

Micropolluants

Terme générique désignant une variété de substances organiques présentes à des concentrations très faibles. Synonyme de → composés traces organiques

Mutagénicité

Aptitude à provoquer des mutations irréversibles et héréditaires, voir
→ génotoxicité

Nitrification

Transformation microbiologique de l'ammonium (NH₄⁺) en nitrate (NO₃⁻)

Oxydation

Réaction chimique dans laquelle la substance à oxyder cède des électrons à un oxydant.

Pesticide

→ Biocide et/ou → produit phytosanitaire

Produits phytosanitaires

Produits constitués de substances actives, de phytoprotecteurs ou de synergistes, et qui ont pour fonction de protéger les plantes ou les produits végétaux contre les organismes nuisibles, de réguler la croissance des plantes, de conserver des produits végétaux, de détruire des plantes ou parties de plantes indésirables (sauf algues), ou d'entraver ou empêcher la croissance indésirable de plantes (sauf algues). Ce peuvent être des substances chimiques, mais aussi des microorganismes ou des macro-organismes.

Radical hydroxyle

Molécule (radical OH) présente dans les solutions aqueuses, réagissant très rapidement et de façon non spécifique. Les →POA reposent sur l'action de ces molécules.

REACH

Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH, Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals)

Rétentat

Concentré (ce qui ne traverse pas la membrane)

Substances et micropolluants spécifiques à la Suisse

Substances représentatives de la pollution des lacs et des cours d'eau suisses par les eaux usées communales. Voir Götz et al. 2010b

Substances traces

Terme générique pouvant désigner une variété de substances présentes à de très faibles concentrations. Il existe des éléments traces organiques, ainsi que des éléments traces anorganiques comme les métaux (lourds).