

Zeitschrift:	Archives des sciences [2004-ff.]
Herausgeber:	Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève
Band:	66 (2013)
Heft:	2
Artikel:	Polluants émergents : stratégie de surveillance de la contamination des eaux de surface et implications pour le traitement des eaux potables : cas du Léman
Autor:	Ramseier Gentile, Stéphan / Edder, Patrick / Loizeau, Jean-Luc
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-738483

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Polluants émergents; stratégie de surveillance de la contamination des eaux de surface et implications pour le traitement des eaux potables

Cas du Léman

Stéphan RAMSEIER GENTILE¹, Patrick EDDER² et Jean-Luc LOIZEAU³

Ms. reçu le 19 août 2013, accepté le 30 septembre 2013

I Abstract

Emerging pollutants: monitoring strategy of the surface water contamination and implications for the treatment of drinking water – Lake Geneva case study. – Recent advances in instrumental analytical chemistry (liquid chromatography-tandem mass spectrometry: LC MS-MS) have enabled the emphasis of several xenobiotic trace compounds (ng/L to several hundreds of ng/L) in the waters and fish of Lake Geneva. These substances come in part from medical usage, but also from industrial production in the watershed, their use in agriculture (pesticides), and industrial and chemical production in the watershed (anti-corrosion agents, anti-bacterial agents, repellents, flame retardants, cosmetics, etc.). Interpretation of the risks from these “emerging” micropollutants on humans and the environment is challenging because of the limited available data, assessments or studies in the field of these “emerging” micropollutants. The treatment processes of 11 drinking water stations using Lake Geneva water are described. Results show that ozone and activated carbon filtration beds are effective treatments that may become mandatory in the future to remove these substances in drinking water, even if the current legislation regulates only pesticides. Continual analytical monitoring of the watershed and the lake water, in conjunction with public education and implementation of appropriate technologies in wastewater treatment plants, should be established to reduce needs and release of these undesirable compounds into the environment.

Keywords: micropollutants, Lake Geneva, water purification, treatment, pesticides, drugs, fish

I Résumé

Les récents progrès de la chimie analytique instrumentale (chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem; LC MS-MS) permettent de mettre en évidence plusieurs composés xénobiotiques à l'état de trace (du ng/L à quelques centaines de ng/L) dans les eaux du Léman ainsi que dans la chair des poissons. Ces substances proviennent en partie d'un usage médical, mais également d'une production industrielle dans le bassin versant, de leur utilisation en agriculture (phytosanitaires) ainsi que de l'emploi quotidien de formulations qui font appel à la chimie; agents anticorrosion, antibactériens, hydrofuge, retardateurs de flamme, cosmétiques, etc. L'interprétation des risques environnementaux ou humains

¹ Services industriels de Genève, Pôle Environnement, 1211 Genève 2, Suisse.

² Service de la Consommation et des Affaires Vétérinaires, 1211 Genève 4, Suisse.

³ Auteur pour la correspondance. Institut F.-A. Forel, Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Faculté des sciences, Université de Genève, 1290 Versoix, Suisse; et Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève. E-mail; Jean-Luc.Loizeau@unige.ch

liés à la présence indésirable de ces composés est délicate du fait du peu de données disponibles, d'évaluations ou d'études dans le domaine de ces micropolluants dits «émergents». Les filières de traitement de 11 stations de potabilisation de l'eau du Léman sont décrites. Les résultats montrent que l'ozone et la filtration sur lits de charbons actifs sont des traitements efficaces et deviendront impératifs, dans le futur, pour éloigner ces substances étrangères de l'eau potable même si la législation actuelle ne régule que les phytosanitaires. Une veille analytique soutenue dans le bassin versant et les eaux du lac suivie d'une information au public devrait être mise en place pour que l'instauration de traitements appropriés dans les STEP conjuguée à un usage plus raisonnable de ces micropolluants réduise, à l'avenir, les quantités de ces composés indésirables dans notre environnement.

Mots-clés: micropolluants, Léman, eau, potabilisation, traitements, phytosanitaires, médicaments, poissons

1. Introduction

Les perturbateurs endocriniens, les médicaments, les produits cosmétiques, les phytosanitaires représentent quatre des principales classes des contaminants dits «émergents». La cristallisation de ces nombreuses et diverses substances au sein de notre conscience tient, en partie, aux progrès réalisés par la chimie analytique instrumentale qui, aujourd'hui, met en lumière et quantifie ce qui était invisible, voire insoupçonné hier. En revanche, la dissémination de ces composés au sein de notre environnement est clairement imputable de tous temps aux activités de l'homme.

La société moderne s'est rendue très dépendante d'une vaste palette de produits chimiques de toutes sortes. Par exemple, on dénombre près de 9000 différents additifs alimentaires et plus de 3300 substances pharmaceutiques sont utilisées dans le domaine de la santé humaine uniquement. Au total, pas moins de 70 millions de molécules différentes et commercialement disponibles sont inscrites au registre du C.A.S (Chemical Abstracts Services 2013) dont la majeure partie est constituée de composés organiques de synthèse.

Aussi, l'usage sans cesse accru et parfois immoderé de ces composés dans la vie quotidienne se traduit par la dissémination, le transport et *in fine* par la redistribution de toutes ces molécules au sein de la biosphère. Hormis les composés très volatils, la majeure partie des substances chimiques introduite au sein de notre environnement finit à moyen terme par envahir les eaux superficielles (cours d'eaux, lacs) ainsi que les nappes phréatiques. Toutes les ressources nécessaires à la production d'eau potable peuvent ainsi en subir les impacts.

L'eau conjuguant les vertus d'être à la fois source de toute vie et de «solvant universel», celle-ci est donc susceptible de délivrer aussi bien ses précieux oligo-éléments (de natures minérales) que ces indésirables polluants qu'elle est susceptible de véhiculer.

Ces contaminants sont mis en évidence au sein de notre environnement aquatique dans une fourchette qui s'étale du ng/L au µg/L. Ces concentra-

tions «relativement» faibles ont déterminé le nom qui leur a été attribué; les micropolluants. Ces «faibles teneurs» sont toutefois en rapport inverse du nombre de molécules qui sont aujourd'hui mises en évidence. De plus, les concentrations des effluents de stations d'épuration (STEP) industrielles, communales voire hospitalières sont généralement bien plus élevées que les traces rencontrées dans les lacs où une dilution naturelle vient embellir la situation qui prévaut dans les affluents. Enfin certaines molécules sont – même à ces concentrations minimales – suspectées d'avoir des effets néfastes sur l'environnement.

Certains de ces composés à caractère anthropique étaient déjà connus depuis la fin des années 70 (les polychlorobiphényles par exemple) mais ce n'est que depuis les années 90 que l'attention des chercheurs s'est focalisée sur ceux-ci lorsque la communauté scientifique prit conscience de leur effet délétère sur la biocénose. On se rendit alors compte que certains de ces micropolluants étaient capables d'altérer les fonctions du système hormonal (endocrinien) des organismes aquatiques à leur contact.

En effet, parmi ces micropolluants se cache une catégorie particulièrement insidieuse de substances appelées les «perturbateurs endocriniens». Celles-ci interfèrent avec le métabolisme hormonal et produisent des effets délétères directs sur les organismes ainsi que sur leurs descendants. Au début des années 90 on constatait alors de plus en plus fréquemment; apparition d'hermaphrodisme chez les poissons mâles exposés aux rejets de STEP; masculinisation de certaines espèces de poissons femelles exposées aux rejets industriels; accroissement du taux d'avortement et de stérilité du bétail de ferme; féminisation des congénères mâles chez les mouettes; ou changements de sexe chez les alligators (BUWAL 1999).

Parallèlement, on mit également en évidence des troubles de la fonction reproductrice chez l'être humain; diminution de la quantité et de la qualité de la liqueur séminale; retard de croissance fœtale; anomalies dans le positionnement de l'urètre; prévalence accrue des tumeurs de la prostate, des testicules et des seins.

Enfin en 2006, on note que la proportion masculine de nouveaux nés est en décroissance importante aux Etats-Unis et au Japon (Davis et al. 2007). La palette de substances (d'origine anthropique pour la plupart) potentiellement dotées de propriétés aussi pernicieuses engloberait; les hormones naturelles et de synthèse; les produits de dégradation des détergents (alkylphénols); certains pesticides; les plastifiants (très utilisés; biberons, CD, DVD, jouets, colles, peintures); les dioxynes (résultant de la combustion); les composés polybromés, polychlorés; les filtres UV (utilisés dans les crèmes solaires).

Les traitements appliqués à l'eau lors de sa potabilisation permettent – pour autant qu'ils soient efficaces et correctement menés – de s'affranchir de ces contaminants mais il existe également d'autres voies d'exposition que la consommation d'eau potable.

Actuellement, toutes les relations de cause à effet ne sont pas encore clairement établies entre les polluants incriminés et les effets constatés chez l'être humain; l'enchevêtrement probable de différentes causes empêche encore de cerner avec certitude les vecteurs des perturbations des fonctions reproductrices.

Le but de cet article est de faire le point sur la stratégie de surveillance de la contamination des eaux du lac par les polluants «émergents» en rappelant l'évolution des performances des analyses chimiques, d'identifier les risques pour l'homme et l'écosystème et d'évaluer les impacts potentiels de ces polluants lors du traitement des eaux potables. Cette revue se base principalement sur les résultats des mesures effectuées par la CIPEL dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux du lac.

■ 2. Les micropolluants émergents

Toutes les substances chimiques utilisées par l'homme peuvent se retrouver potentiellement dans l'environnement, que ce soit sous leur forme initiale ou transformée selon des processus de dégradation ou de métabolisation par les organismes vivants.

Auparavant, les moyens analytiques ne permettaient de mettre en évidence que très peu de ces micropolluants. Ce n'est plus le cas aujourd'hui où les progrès de la chimie analytique font qu'il est maintenant possible de les identifier et de les mesurer à des concen-

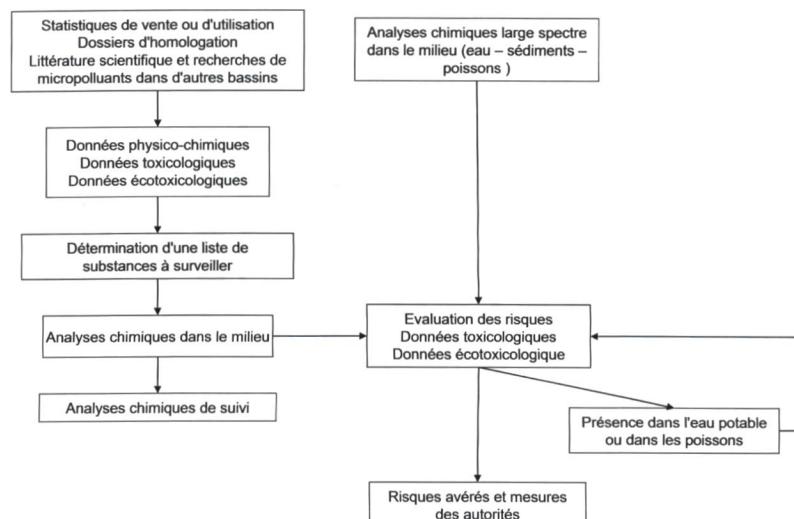


Fig. 1. Schéma de la stratégie de veille des micropolluants.

Fig. 1. Strategy for micropollutants watch.

trations très faibles dans notre environnement. La plupart d'entre eux sont d'ailleurs présents depuis longtemps, mais leur présence dans l'eau, les sédiments ou les poissons n'avait pas été décelée auparavant. Toutes ces substances nouvellement mises en évidence ces 10 dernières années sont appelées les micropolluants «émergents».

Parmi toutes ces substances, quelles sont celles qui ont le plus de probabilité de se retrouver dans notre environnement? Ont-elles un impact sur ce dernier? Leur présence et ces impacts sont-ils réversibles si les apports sont diminués ou stoppés? Ces substances peuvent-elles se retrouver dans l'eau potable et, le cas échéant, quel est le risque pour la santé humaine? Le suivi scientifique s'attache à apporter des réponses à ces questions pour garantir une visibilité optimale sur la problématique des micropolluants dans le Léman. L'enjeu est à terme d'orienter les autorités de contrôles et gestionnaires pour éviter des pollutions majeures, d'assurer la sécurité des consommateurs d'eau du robinet et des poissons et de préserver l'écosystème lacustre.

La méthodologie consiste dans un premier temps à tenter d'identifier les polluants susceptibles de contaminer le Léman, par une approche théorique. Ensuite, ces substances sont recherchées dans le lac ainsi que toute autre molécule que les capacités analytiques des laboratoires permettent d'investiguer. Cette étape permet d'avoir une approche exploratoire à la fois orientée et reposant sur un large spectre d'analyses chimiques. Enfin, les concentrations observées dans le Léman sont interprétées pour poser un diagnostic sur les risques de toxicité pour l'écosystème (écotoxicité), la satisfaction aux objectifs environnementaux portés par les institutions et les usages éventuellement compromis (Fig. 1).

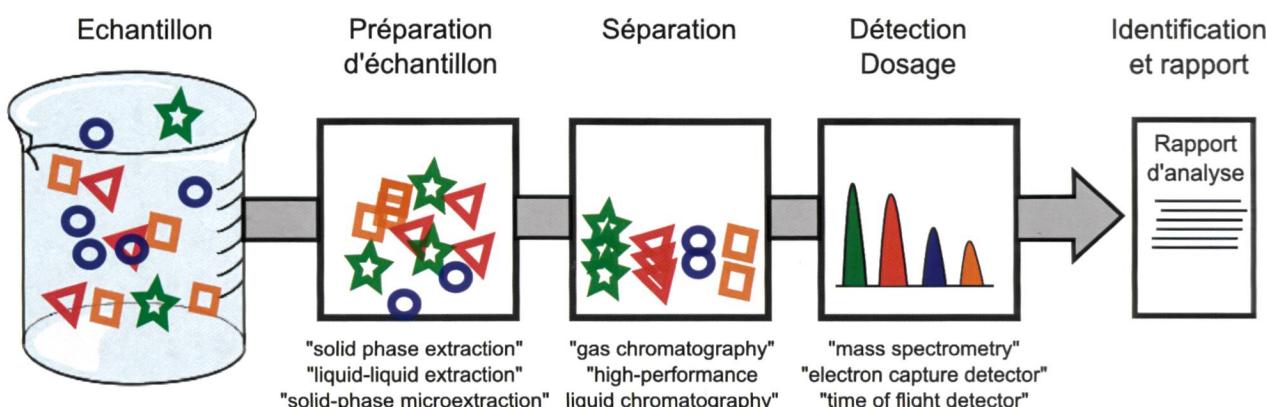


Fig. 2. Processus de l'analyse chimique des micropolluants.

Fig. 2. Process of micropollutants chemical analysis.

3. Évolution des performances des analyses chimiques

Les outils d'analyses chimiques ont évolué de manière spectaculaire au cours de ces dernières décennies et chaque année de nouvelles solutions s'offrent aux laboratoires. De fait, nombre de polluants émergents sont en réalité des substances qui étaient déjà présentes dans l'environnement mais que les laboratoires ne recherchaient pas ou qui n'étaient techniquement pas détectables.

Jusqu'en fin des années 90, la majorité des laboratoires se préoccupaient uniquement des micropolluants traditionnels de l'environnement tels que les pesticides organochlorés et organophosphorés ou encore les PCB. Cela en raison de l'utilisation quasi exclusive de la chromatographie gazeuse (GC) comme méthode de séparation limitant ainsi l'analyse aux composés organiques volatils et stables thermiquement. La chromatographie liquide (LC), idéale pour la détection de substances polaires (très solubles dans l'eau) et non volatiles qui ne peuvent s'analyser en GC, était pourtant relativement peu utilisée en raison du manque de sélectivité des détecteurs et de la qualité moyenne de la séparation rendant incertaine l'identité des composés détectés. Le seul moyen d'y remédier était la mise en place de préparations d'échantillons sélectives, longues et fastidieuses et qui, de plus, étaient limitées à l'analyse de quelques substances aux propriétés physico-chimiques très similaires (par ex. triazines, pyréthroïdes, ...).

L'amélioration des séparations chromatographiques ainsi que la mise sur le marché de nouveaux types de détecteurs ultraperformants (par ex. spectromètre de masse tandem MS-MS) pour la GC et la LC ont révolutionné le travail quotidien au laboratoire. Les performances analytiques ont évolué de manière

spectaculaire en terme de sensibilité ou de sélectivité et ont rendu possible le développement de nouvelles méthodes d'analyses, plus rapides (< 10 min), plus sélectives et plus sensibles (< 1 ng/L).

Le processus analytique classique actuel peut se partager en trois étapes (Fig. 2); la préparation d'échantillon, suivi de la séparation chromatographique des molécules présentes dans l'extrait et finalement d'une méthode de détection. Grâce aux grandes sélectivités et sensibilités apportées par les détecteurs MS, les méthodes de préparation d'échantillons ont été simplifiées avec pour unique objectif de concentrer les micropolluants et de les rendre détectables. Les préparations d'échantillons ont donc évolué vers des méthodes génériques rendant ainsi possible la détection de composés qui n'auraient pas été prévus initialement et/ou avec des propriétés physico-chimiques très différentes sans devoir multiplier les méthodes d'analyses lors du suivi de nombreux paramètres.

Le spectre des contaminants analysables s'est donc considérablement élargi par l'utilisation conjointe de la GC-MS et de la LC-MS et de préparation d'échantillon non sélective. Les méthodes d'analyses sont désormais multi-composés et il est aujourd'hui possible de détecter plusieurs centaines de substances à la concentration du ng/L en quelques minutes ou encore d'identifier de nouveaux contaminants à l'aide des données spectrométriques.

Cela a une importance capitale pour la recherche de micropolluants, car la question que se posent aujourd'hui les laboratoires est comment rechercher, identifier et doser dans l'environnement les milliers de polluants susceptibles d'être émis par les activités humaines, que ce soit dans la vie quotidienne, l'agriculture ou l'industrie. Une des solutions est sans aucun doute l'utilisation de méthodes rapides, générant

riques, permettant une adaptabilité importante des laboratoires et la capacité d'évoluer en fonction des changements rapides des habitudes de consommation, des pratiques agricoles ou encore des activités industrielles.

En résumé, aujourd'hui, il est possible de mesurer simultanément plusieurs centaines de substances et ce avec une certitude accrue de leur identité et de leur quantité, et à des concentrations de plus en plus faibles.

L'analyste de l'environnement possède donc désormais un bon arsenal technologique pour répondre aux nouvelles questions qui se posent. Dans les décennies à venir, les évolutions technologiques vont se poursuivre et on peut sans aucun doute s'attendre à l'amélioration continue des performances analytiques. Le suivi des micropolluants sera amélioré et permettra plus facilement l'identification précoce de polluants émergents. La popularisation de ces nouveaux outils d'analyse sera sans aucun doute à l'origine de nouvelles découvertes dans le domaine des micropolluants.

14. Organiser le suivi de veille

Au vu de la multitude des substances utilisées dans notre mode de vie et de nos pratiques agricoles, il est nécessaire d'adopter en premier lieu une approche théorique consistant à identifier les polluants susceptibles d'être émis par les activités humaines.

Pour cela, il est possible d'utiliser les données statistiques d'utilisation, de vente ou de production pour estimer la production possible de polluants sur le bassin versant du lac et de retraduire le transfert entre l'activité émettrice et le milieu récepteur par des facteurs correctifs plus ou moins forts selon l'abattement ou la rétention attendus.

Cet exercice théorique reste néanmoins délicat à conduire car les données de base sont pour beaucoup difficiles d'accès, rapidement dépassées par rapport à l'actualité des pratiques et partielles au regard de l'ensemble des usages, notamment industriels.

Sur le Léman, l'exercice a été tout d'abord conduit pour les produits phytosanitaires à partir de 2005 (Edder et al. 2006). Puis, progressivement ce sont les résidus pharmaceutiques et les substances produites par les activités industrielles qui ont été traités.

Il a permis de définir des listes de substances ciblées pour lesquelles la CIPEL se donne les moyens d'effectuer un diagnostic sur l'état de contamination du Léman.

Par ailleurs il est très intéressant de compléter cette liste par des analyses de dépistage intégrant des substances pour lesquelles on a peu, ou pas, d'informations, mais pour lesquelles les capacités analytiques des laboratoires permettent de réaliser des analyses exploratoires. C'est cette approche qui a été conduite en premier lieu sur les produits phytosanitaires, et également sur les résidus médicamenteux.

Dans certains cas, comme par exemple les substances provenant des cosmétiques, de la dégradation de matériaux ou encore de produits de nettoyage, l'analyse chimique est actuellement la seule approche possible, en l'absence de données et de connaissances techniques et écotoxicologiques. Dans ce cas, lorsque des méthodes d'analyse existent, des recherches exploratoires sont opérées afin d'observer la présence éventuelle de ces substances dans le milieu. C'est ainsi que de très nombreuses espèces chimiques ont été recherchées et parfois mises en évidence dans notre environnement (Edder et al. 2006, 2007, 2008), comme les filtres UV (substances utilisées dans les crèmes et lotions solaires) ou les cosmétiques, les muscs polycycliques (substances utilisées notamment comme parfums dans les lessives comme le galaxolide et le celestolide), le triclosan (composé possédant des propriétés antifongiques et antibactériennes et classé comme perturbateur endocrinien), les parabènes (agents conservateurs utilisés dans la plupart des cosmétiques), le benzotriazole (agent anticorrosion utilisé dans les produits lave-vaisselle et par les industries pour tuyauteries), préserver les phtalates (famille de substances utilisées comme additifs dans les matières plastiques afin de les rendre souples et dont certaines ont un potentiel de perturbateur endocrinien), les nonylphénols (produits de dégradation de certains détergents à usage domestique courant et ayant un fort potentiel de perturbateur endocrinien).

La mise en œuvre de techniques analytiques modernes a parfois aussi permis de détecter des substances qui ne figuraient pas dans le programme de veille. Ce fut notamment le cas de la mépivacaïne en 2007. En effet, ce fut lors de l'analyse de produits phytosanitaires que cet anesthésiant, utilisé principalement en médecine dentaire, a été décelé tout à fait par hasard dans les eaux du Léman. Les concentrations mesurées dans le lac de 20 à 90 ng/L (Edder et al. 2008), ce qui correspond à presque 5 tonnes de matières actives, ne pouvaient s'expliquer seulement par un usage médical. La mépivacaïne étant produite en Valais, c'est une industrie qui est à l'origine de cette pollution. Ce médicament, ainsi que d'autres synthétisés ou formulés sur le bassin versant, est maintenant intégré dans le programme de suivi mené sur le Rhône (Bernard et al. 2007, 2008, 2009) et sur le Léman (Edder et al. 2008, 2009).

Les approches théoriques et par analyses chimiques sont donc parfaitement complémentaires et sont le gage d'une vision étendue mais jamais exhaustive de l'état des lieux. Se passer de l'une ou de l'autre présente le risque de passer à côté de polluants majeurs.

5. Interpréter les résultats et identifier les risques

Lorsque des substances incluses dans le programme de veille sont détectées dans l'environnement, une analyse du danger et du risque pour l'homme (eau de boisson ou poissons) et/ou pour l'environnement devient nécessaire. En effet, comme le montre la Fig. 3, il faut différencier le processus nécessaire à l'analyse de risque, puis de sa gestion.

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier le danger que représente la présence du micropolluant dans l'environnement ou les denrées alimentaires. L'approche actuelle consiste à comparer les données toxicologiques ou écotoxicologiques avec les concentrations mesurées dans le milieu. Le risque est ensuite évalué en tenant compte de l'exposition de la population ou des organismes vivants (plantes, poissons, phyto- et zooplancton...). La gestion du risque correspond ensuite aux mesures que les autorités prendront ou pas pour l'éliminer ou le réduire. La gestion du risque n'est alors plus seulement une affaire de scientifiques, mais comporte essentiellement une dimension politique.

5.1. Le risque pour l'Homme

Si les contaminants sont retrouvés dans l'eau de boisson ou des poissons destinés à la consommation humaine et en l'absence de valeurs réglementées par la législation, il est nécessaire de rechercher les données toxicologiques et notamment la Dose Journalière Admissible (DJA) afin d'appréhender le danger que représente les substances en question. Dès lors, il convient de comparer la DJA avec l'exposition du consommateur en tenant compte des habitudes de consommation. Si cette dernière est supérieure à la DJA, tout risque pour la santé n'est plus exclu. Les mesures à prendre appartiennent ensuite aux autorités qui devront alors gérer la problématique.

5.2. Le risque pour l'écosystème

Pour évaluer le potentiel toxique des polluants sur les organismes aquatiques, une comparaison est réalisée entre la mesure effectuée dans le milieu et la concentration la plus faible pour laquelle on ne prévoit

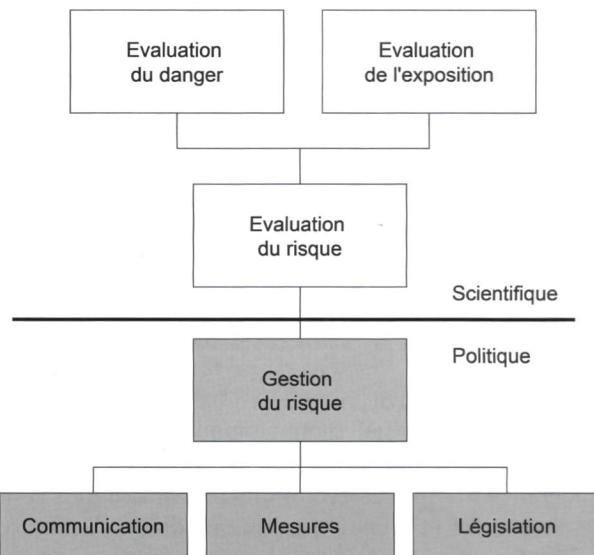


Fig. 3. Processus menant à la gestion du risque.

Fig. 3. Process leading to risk management.

aucun effet sur l'environnement; la PNEC (European Commission 2003). La PNEC (Predictive No Effect Concentration) est évaluée au moyen de tests toxicologiques, en général sur diverses espèces comprenant des algues, des plantes aquatiques, des petits crustacés (daphnies), ou des poissons. Deux types d'études écotoxicologiques peuvent être menées;

- toxicité aiguë; le toxique est mis en contact avec les organismes à des concentrations différentes et on détermine celle qui provoquera un taux de mortalité ou des effets mesurables sur 50% des individus (EC50). Dans ce type d'étude on mesure une action immédiate du toxique.
- toxicité chronique; le toxique est mis en contact avec les organismes à des concentrations différentes pendant une longue période de temps et on détermine celle pour laquelle on n'a mesuré aucun effet sur les organismes (NOEC: No Observed Effect Concentration).

Selon le type de données à disposition, la PNEC est déterminée en réduisant la EC50 d'un facteur de sécurité de 100 à 1000, ou la NOEC par un facteur de 10 à 100. Lorsque suffisamment d'études sont à disposition, il est également possible d'affiner la détermination de la PNEC (Chèvre 2006). Si la concentration mesurée dans le milieu est supérieure à la PNEC, tout risque n'est pas exclu pour l'écosystème. Il convient alors aux autorités de gérer le risque et décider des suites à donner à cette observation.

En pratique, il est très fréquent que les autorités de surveillance ne disposent pas d'une valeur de DJA ou de PNEC. En effet, le profil toxique et écotoxicique des substances n'est pas toujours évalué et souvent, par-

Tableau 1: Etudes écotoxicologiques pour la ciprofloxacine (Garric et Ferrari 2004; Gollet et al. 2002; Halling-Sorensen et al. 2000).

Organisme	Genre, espèce	EC50 ($\mu\text{g/L}$)	NOEC ($\mu\text{g/L}$)
Bactérie	Bactéries de boues activées	610	
Bactérie	<i>Pseudomonas putida</i>	80	
Algue verte	<i>Selenastrum caprinormutum</i>	2970	
Cyanobactérie	<i>Microcystis aeruginosa</i>	5	
Bactérie	<i>Pseudomonas putida</i>		10
Crustacé	<i>Daphnia magna</i> 48 h		60 000
Poisson	<i>Danio rerio</i> 72 h		100 000

EC50; Concentration ayant donné un effet dans 50% de la population testée.

NOEC; Concentration pour laquelle aucun effet n'a été observé lors de test de toxicité chronique.

ticulièrement en Suisse, les données ne sont pas publiques. Dès lors, l'estimation du risque est difficile dans la plupart des cas, voire impossible!

Par exemple, il existe très peu de données écotoxicologiques pour les médicaments ou certaines substances à usages domestiques et industriels (Loizeau et al. 2013, ce volume). Dans certains cas, comme pour la mépivacaïne ou le benzotriazole (agent anticorrosion présent dans des produits à usage domestique comme les poudres pour lave-vaisselle ou industriel pour nettoyer et protéger les canalisations des usines), les concentrations mesurées dans le Léman, 180 ng/L en moyenne, sont particulièrement élevées et aucune information n'est disponible. Toute analyse de risque est dès lors impossible.

Ce n'est que récemment que des informations environnementales sont exigées pour l'homologation des médicaments (du moins en France). D'autres situations font état de données qui peuvent être lacunaires ou pires, contradictoires. Pour illustrer cette difficulté, le cas de la ciprofloxacine peut être un bon exemple. La ciprofloxacine est un antibiotique qui a été retrouvé dans le Léman à une teneur de 0.097 $\mu\text{g/L}$. Le tableau 1 présente les données de toxicologies environnementales à disposition dans la littérature scientifique, état 2004 (Garric et Ferrari 2004; Gollet et al. 2002; Halling-Sorensen et al. 2000). La plus basse donnée de toxicologie chronique est de 10 $\mu\text{g/L}$. La PNEC calculée sur cette base avec un facteur de sécurité de 10 est donc de 1 $\mu\text{g/L}$. Toutefois, la plus faible valeur de toxicité aiguë est de 5 $\mu\text{g/L}$ pour les cyanobactéries. Dans ce cas, la PNEC calculée avec un facteur de sécurité de 100 est 0.05 $\mu\text{g/L}$ et est donc inférieure à la concentration mesurée dans le Léman, ce qui indiquerait qu'il existe un risque environnemental non négligeable. En conséquence, avec de telles données à disposition, il absolument impossible pour des scientifiques d'évaluer un risque et donc pour les autorités de prendre des mesures contraintantes afin de limiter une pollution de ce type.

Il serait nécessaire de s'attacher à créer des données fiables dans ce domaine en ayant des protocoles d'expérience normalisés et surtout un élargissement considérable des substances testées. Engagé depuis juin 2007 le programme européen REACH va dans ce sens puisqu'il prévoit de caractériser les impacts toxicologiques pour l'homme et l'environnement de plus de 10 000 substances chimiques couramment utilisées dans notre monde moderne (http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach/index_fr.htm).

Toutefois, si ambitieux soit-il, ce programme ne jettera un éclairage que sur une fraction des substances chimiques utilisées régulièrement (plus de 60 000 molécules)!

■ 6. Qualité de l'eau potable issue du Léman

De par son utilisation quotidienne de l'eau (lavage et préparation des aliments, boissons, hygiène corporelle), l'être humain est évidemment concerné de très près par la qualité du liquide s'écoulant à son robinet qui, le cas échéant, peut présenter un vecteur majeur, (aigu ou chronique) de l'exposition à certaines substances toxiques.

Aussi, il convient non seulement de s'intéresser à l'état de santé de cette immense ressource qu'est le Léman, mais également aux procédés mis en œuvre pour traiter cette eau afin qu'elle souscrive pleinement aux exigences légales d'une eau considérée comme potable.

L'essentiel du procédé physico-chimique visant à rendre une eau potable est un processus qui cherche – du moins dans nos régions et avec les qualités d'eau de nos ressources – à retrancher ou à éradiquer les éléments suivants;

- Les matières en suspension, que celles-ci soient d'origines minérales (sables, limons, argiles) ou organiques (résidus de végétaux, algues, etc)
- La matière organique sous forme d'une dispersion colloïdale («particules» dont la taille est inférieure au micromètre).
- Les micro-organismes pathogènes (bactéries, protozoaires, virus) ainsi que d'autres organismes (non-pathogènes) qui pourraient potentiellement être présents pour les uns et en trop grand nombres pour ces derniers.

Cet objectif est atteint au moyen d'un traitement complet correctement mené et constitué de plusieurs phases distinctes; une filière récente comporte ces

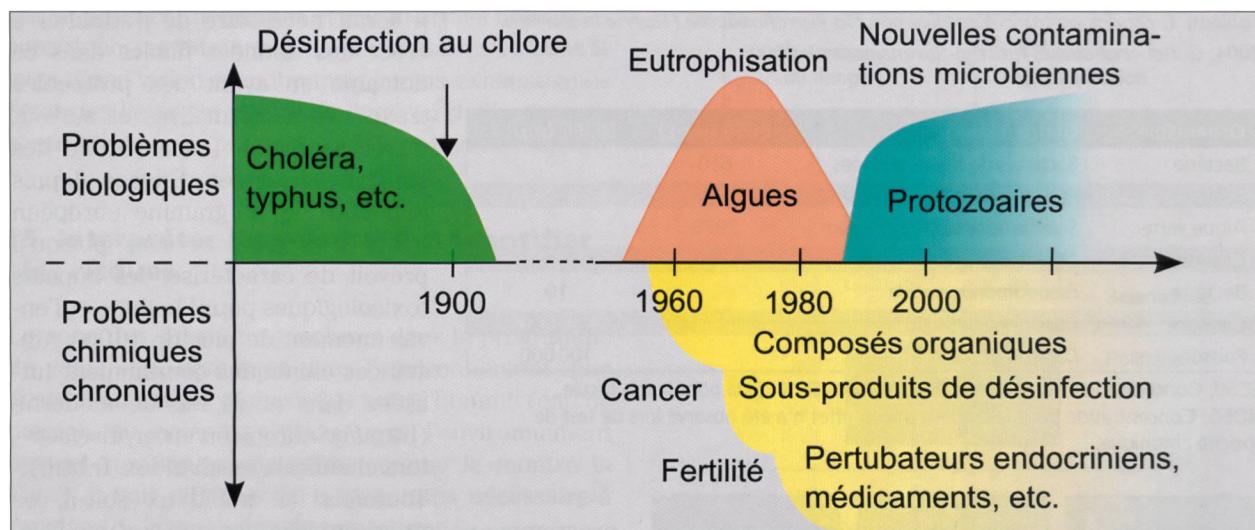


Fig. 4. Evolution des problèmes liés à l'eau potable dans les pays industrialisés depuis la fin du XIX^e siècle à nos jours (Von Gunten 2008, avec permission).

Fig. 4. Evolution of water related issues in industrialized countries from the late 19th century to the present day (Von Gunten 2008, with authorization).

3 phases dont les objectifs sont décrits ci-dessus. Les technologies membranaires modernes (filtrations poussées; ultrafiltration voire nanofiltration) permettent toutefois de réaliser ces objectifs en une étape unique.

John Snow avait démontré en 1854 que le foyer de choléra qui frappa le quartier de Soho à Londres était la fontaine publique à laquelle la population venait se servir puis Pasteur – en 1881 – mis en évidence l'existence des bactéries et leur rôle dans la propagation des maladies. Aussi, dans le courant du XIX^e siècle on se rendit compte que la filtration de l'eau au travers de couches de sables de granulométries choisies permettait d'améliorer sa limpidité et par la même occasion de diminuer les risques de tomber malade après son ingestion. Techniquement, cette opération permettait, dans le même temps, d'opérer une rétention des matières en suspension (résidus végétaux, particules) et des micro-organismes qui sont fixés sur les dites matières (ces dernières leur assurant à la fois un support de croissance et les nutriments nécessaires à leur développement). A la suite de la découverte de Pasteur, on chercha à éradiquer les bactéries au moyen de désinfectants appropriés. Cet ainsi que furent essayés successivement divers réactifs; la chaux, le cuivre, l'iode, le permanganate, le chlore (1881) puis l'ozone (1894).

Soulignons que l'aspect «désinfection» a été considéré jusqu'à récemment comme la phase la plus importante du traitement dans la mesure où un disfonctionnement de cette étape peut potentiellement conduire à des problèmes rapides de santé publique (survenue de cas de gastro-entérites voire d'épidé-

mies). Ainsi depuis le début du XX^e siècle, l'usage de lits filtrants à sables conjugué à une désinfection efficace a permis de réduire spectaculairement la mortalité due à la fièvre typhoïde et au choléra (Fig. 4) (Von Gunten 2008). Ce type de filière de traitement est resté en vigueur pendant plusieurs décennies avec quelques améliorations conférées par l'usage de coagulants (alun, sels de fer ou d'aluminium) qui permettaient d'accroître l'efficacité de la filtration; témoins en sont certaines installations sur le pourtour du lac, installations qui étaient encore en fonction récemment (Ramseier et al. 2003; Edder et al. 2006).

La phase de désinfection consiste souvent en l'utilisation de réactifs chimiques qui sont des oxydants puissants (chlore et ses dérivés, ozone); ils éradiquent les micro-organismes mais présentent aussi l'inconvénient de réagir chimiquement avec bon nombre de substances – de nature organique – contenues naturellement dans les eaux. Ces réactions secondaires, non désirées, conduisent à l'apparition de composés (appelés sous-produits de la désinfection) initialement non présents au sein de la ressource et qui ont l'inconvénient d'altérer les qualités organoleptiques de l'eau, voire de rendre celle-ci non potable si leur concentration est trop élevée.

L'un des moyens de limiter la présence de ces sous-produits consiste à s'affranchir des précurseurs naturels susceptibles de se combiner avec les désinfectants employés. La présence de ces précurseurs naturels s'est accrue à partir des années 60 du fait d'une eutrophisation marquée des eaux superficielles (Rapin et Gerdeaux 2013, ce volume). Aussi l'évolu-

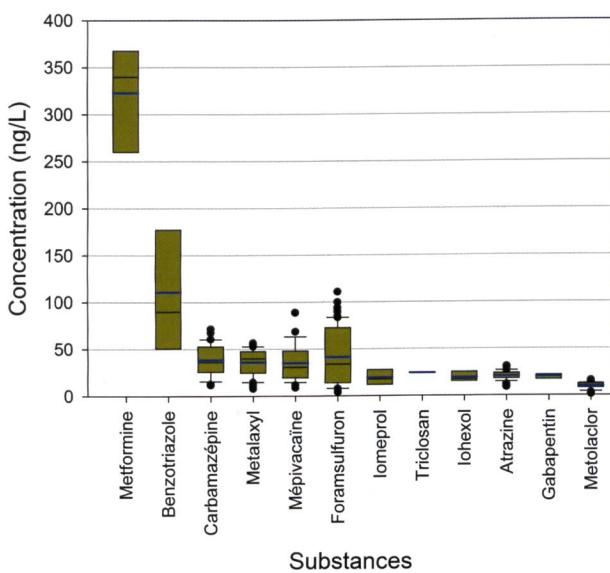


Fig. 5. Box plots présentant les concentrations des substances xénobiotiques mesurées lors des campagnes CIPEL à la station SHL2 (centre du lac, fig. 6A) toutes profondeurs confondues pour les années 2005 à 2009 (Edder et al. 2006, 2007, 2008, 2009; Ortelli et al. 2010). La ligne noire représente la médiane, la ligne bleue la moyenne, les extrémités de la boîte les 25 et 75 percentiles, les moustaches les 90 et 10 percentiles, les points noirs les valeurs extrêmes (outliers).

Fig. 5. Box plots of the concentrations of xenobiotics measured by CIPEL at the SHL2 site (center of the lake, fig. 6A), all depths included for years 2005 to 2009 (Edder et al. 2006, 2007, 2008, 2009, 2010; Ortelli et al 2010). The black line corresponds to the median, the blue line to the mean, the box ends to the 25 et 75 percentiles, the whiskers to the 90 et 10 percentiles, and the black dots are outliers.

tion «naturelle» des choses imposait-elle de devoir traiter des substances dont la taille était de plus en plus réduite. Ainsi, on est passé de devoir s'affranchir (à tout le moins réduire en grande proportion!) des matières en suspension (dimension du mm) à celle des bactéries (μm) pour être confronté finalement aux substances dissoutes (nm).

La filtration sur lits de charbons actifs granulés est en vigueur depuis les années 70; il s'agit d'un des rares procédés, avec les filtrations membranaires modernes, qui permettent de retrancher les substances qui sont à l'état dissous.

Les filières de potabilisation plus récentes (années 80) incorporent souvent une, voire deux étapes d'ozone. Ce mode de traitement poussé permet d'utiliser un désinfectant (virucide, bactéricide) de première force; cependant, son pouvoir oxydant est tel qu'il transforme un bon nombre de substances naturelles en une palette de produits différents comme c'est également le cas des autres désinfectants.

A compter de ces années-là, les méthodologies d'analyses ont également bénéficié des progrès de la science; on se rendit compte alors que l'eau des ressources pouvait aussi contenir une palette de substances dissoutes d'origine humaine. Celles-ci n'étaient que partiellement voire non retenues par les filières en vigueur.

Plus récemment, les techniques analytiques modernes ont vu leur sensibilité et leur précision augmenter dans de notables proportions permettant d'identifier et de quantifier des substances à des niveaux de concentration encore jamais atteints; de l'ordre du nano-gramme par litre.

Dès lors, les investigations menées au moyen de ces techniques ont révélés que les eaux du Léman (et plus généralement les eaux superficielles) étaient le vecteur d'une palette de composés anthropiques bien plus étendue que ce qui était admis antérieurement (Corvi et al. 2005). De surcroît, les concentrations les plus importantes furent mesurées entre 30 et 100 m soit à la profondeur moyenne où sont implantées les crèpines de pompage d'eau (Loizeau et al. 2013, ce volume).

La Fig. 5 présente les 12 substances dont les concentrations sont les plus importantes qui ont été mises en évidence dans les campagnes CIPEL réalisées à ce jour (2005-2009). Certes, les teneurs sont généralement faibles, de l'ordre de quelques dizaines de ng/L mais la dernière molécule mise en évidence (metformine) est celle pour laquelle les quelques mesures réalisées sont les plus élevées. Tous ces micropolluants peuvent être regroupés en fonction de leur usage; la moitié d'entre eux sont en lien avec la médecine moderne (diagnostic, thérapeutique, opératoire);

- Médicaments; metformine, carbamazépine, gabapentine
- Anesthésique; mépivacaïne
- Agent de diagnostic; iomeprol, iohexol
- Agent anti-corrosion; benzotriazole
- Pesticides; metalaxyl, foramsulfuron, atrazine, metolaclor
- Antiseptique; tricosan

Dès lors, les investigations menées sur les eaux brutes (à leur entrée dans les usines de potabilisation) des distributeurs du bassin lémanique (Fig. 6A) montrent que la contamination en pesticides qui prévalait au centre du Léman au point SHL2 était assez similaire pour tous; la somme des teneurs oscillait entre 300 et 400 ng/L (Fig. 6B) (Edder et al. 2006). La concentration pour le seul foramsulfuron – un herbicide – était proche (Fig. 6C) des valeurs limites légales imposées tant par les législations helvétiques que françaises (100 ng/L par substance phytosanitaire et 500 ng/L pour la somme des phytosanitaires détectés).

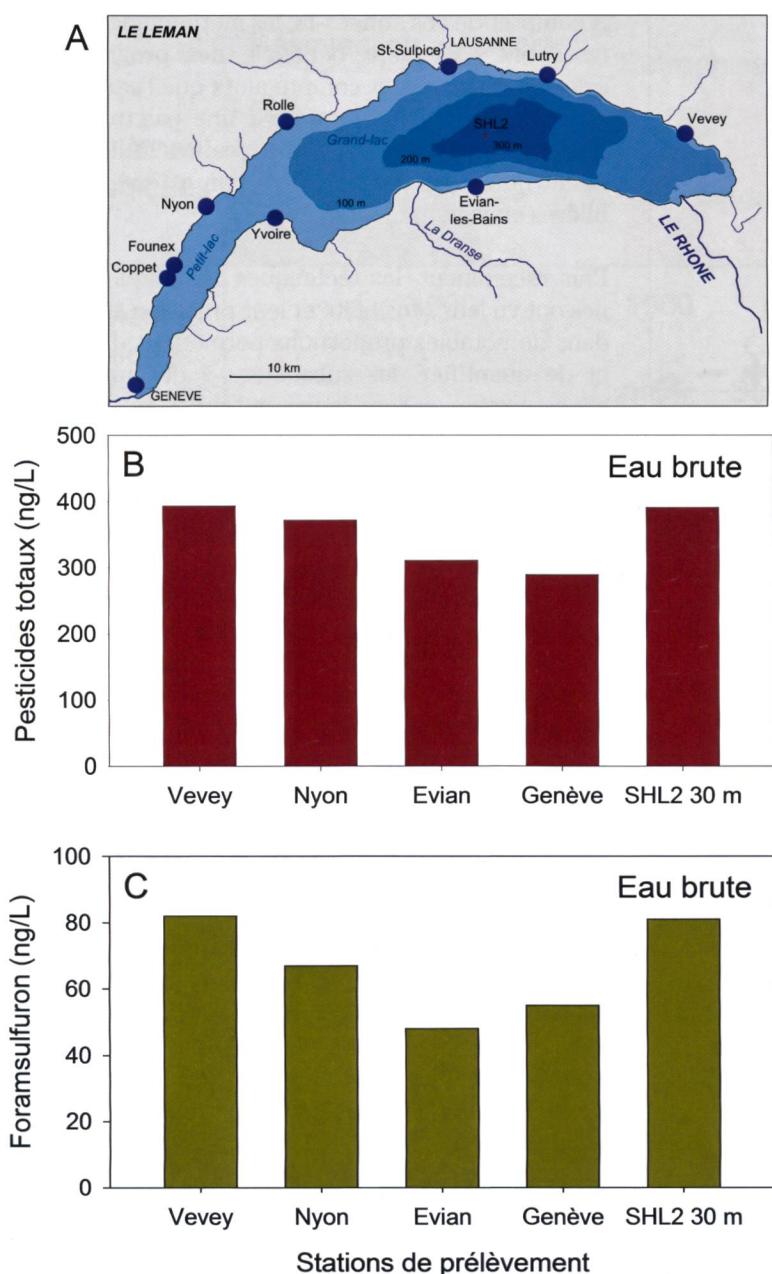


Fig. 6. Localisation des stations de traitement d'eau potable (A) et concentrations en pesticides totaux (B) et foramsulfuron (C) mesurées dans l'eau brute, comparativement au point central SHL2 (profondeur 30 m) en 2005.

Fig. 6. Location of drinking water treatment plants (A) and concentrations of total pesticides (B) and foramsulfuron (C) measured in raw water, compared to water collected in the centre of the lake (SHL2, 30 m depth) in 2005.

Les anciennes filières étant conçues pour l'éradication des pathogènes et pour l'abattement des matières en suspension, on se rendit compte de leur peu d'efficacité pour l'élimination des composés chimiques dissous, bien évidemment indésirables aux robinets des consommateurs.

Le Léman étant la source d'approvisionnement en eau potable pour plus de 600 000 personnes, il convenait dès lors de s'interroger sur les difficultés

rencontrées par les distributeurs d'eau. Ceux-ci regroupaient 11 stations (Tableau 2) de production exploitant des filières toutes différentes (Ramseier et al. 2003). Moins de la moitié de celles-ci disposaient (en 2002) de filtres à charbons actifs; certaines même faisaient état de filières très simples. Aujourd'hui, ces dernières ont presque toutes disparues; la proportion des installations disposant d'une filtration à charbons actif est passée de 45% à 80%, signe que les distributeurs d'eau focalisent désormais leur attention sur ces polluants.

Les études menées en 2005 (Edder et al. 2006) avaient clairement démontré que seuls les traitements combinant l'ozonation et la filtration sur charbon actif étaient capables d'éliminer en quasi-totalité des résidus de pesticides présents dans l'eau brute (Fig. 7).

Cependant les installations de Vevey et d'Evian retranchent tout de même une part des phytosanitaires investigués et ce même sans l'aide de charbon actifs. Cet effet est majoritairement dû au traitement à l'ozone qui permet de transformer (et non de retenir!) par réaction chimique les molécules indésirables. Dans ce cas, la disparition de la substance initiale s'accompagne malheureusement de l'apparition de nombreux composés en concentrations plus faibles mais qui sont bien souvent ignorés – du fait d'une incapacité à les mettre en évidence – et dont l'innocuité ou les effets toxicologiques sont totalement inconnus.

En revanche, la Fig. 8 indique sans ambiguïté que chaque étape de la filière représentée permet l'abattement des pesticides et que les charbons ainsi que leur état d'activation permettent de supprimer la quasi-totalité des substances présentes dans l'eau brute.

Il faut remarquer que l'état d'activité des lits de charbon est un paramètre important; un charbon saturé de matières organiques – naturelles pour la plupart – après 31 mois de service n'est plus aussi efficace qu'un filtre à charbons neuf ou dont le charbon vient d'être régénéré.

Tableau 2: Installations de potabilisation des eaux lémaniques; filières de traitement en vigueur en 2002 et date de mise en service des installations (Ramseier et al. 2003). La situation des stations est présentée sur la Fig. 6A.

Station	année	Filière de traitement exploitée
1 Yvoire	1990	pCl ₂ – F(tambour) – F(poche) – Cl ₂ (en cours de modernisation 2010)
2 St-Sulpice	1970	Al – FS – Cl ₂
3 Lutry	2000	F(plateaux 130 µm) – UF(10 nm) – Cl ₂
4 Vevey	1971	FS – O ₃ – Cl ₂ (en cours de modernisation 2010)
5 Coppet	1939	FS – Cl ₂ (modernisée depuis 2008)
6 Founex	1976	pCl ₂ – FS – CAG – ClO ₂ (modernisée depuis 2008)
7 Rolle	1995	Al – FSb – CAG – UV
8 Evian	1989	FS – O ₃ – CAG – Cl ₂
9 Nyon	1984	pCl ₂ – Al – FSb – O ₃ – CAG – pH _b – Cl ₂
10 Genève Prieuré	1997	pCl ₂ – pH _a – Al – FSb – O ₃ – CAG – pH _b – Cl ₂ et ClO ₂
11 Genève Bellevue	1967	pCl ₂ – Al – FSb – pH _b – Cl ₂ (modernisée depuis 2004)

FS; Filtration rapide sur lit de sable de quartz
 FSb; Filtration rapide sur lit bicouche (pierre ponce / sable de quartz)
 F (plateaux); Filtration sur anneaux mobiles percés
 UF; Ultrafiltration, mode frontal
 F (tambour); Filtration sur tambour rotatif (seuil de coupure; 25 µm)
 F (poche); Filtration au moyen d'une toile (seuil de coupure; 10 µm)

CAG;
 pCl₂;
 Cl₂ et ClO₂;
 O₃;
 UV;
 pH_a - pH_b;
 Al/Fe;

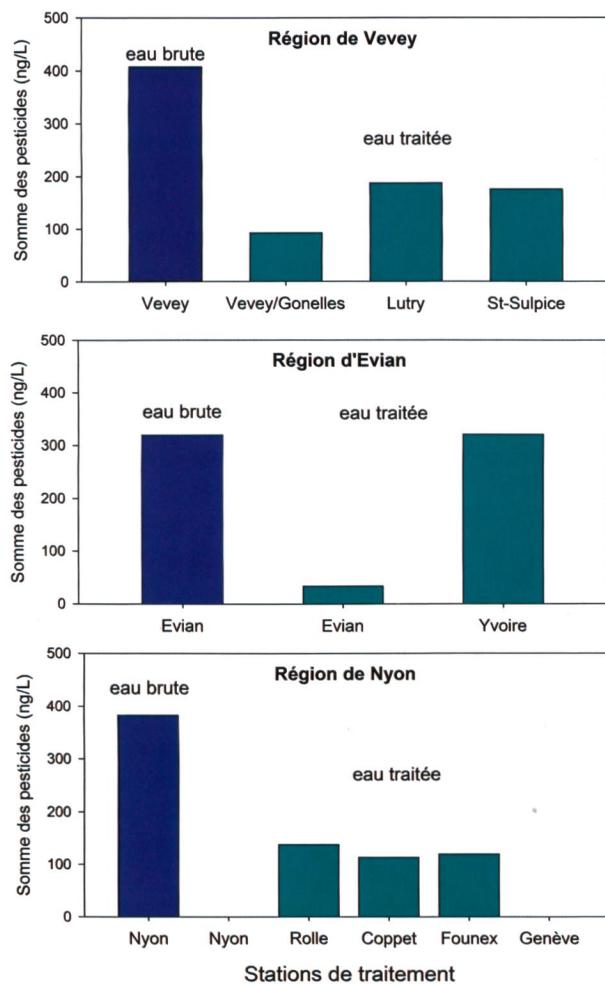
Filtration sur charbon actif granulé
 Préchloration
 Désinfection finale au chlore et/ou dioxyde de chlore
 Ozonation
 Désinfection aux rayons UV
 Correction acide/alcaline du pH
 Floculation au moyen de sels d'aluminium / de fer

De manière générale et quelles que soient les techniques de production d'eau potable mises en œuvre, les concentrations mesurées sont déjà faibles dans l'eau brute du lac et donc inférieures aux normes en vigueur une fois traitée. Ce constat est du moins pleinement valable en ce qui concerne les phytosanitaires pour lesquels une norme de potabilité existe. Le problème est plus délicat dans le cas des autres substances pour lesquelles il n'y a aucune valeur indicative (le 75% des composés représentés à la Fig. 5). Dans ce cas, il est nécessaire de procéder à l'analyse de risque telle que décrite précédemment. Aucun danger pour la population n'a été mis en évidence à l'heure actuelle et l'eau du réseau produite à partir du Léman peut être considérée comme sûre. A noter encore que certaines eaux minérales embouteillées ne sont pas exemptes non plus de contaminants, certaines sources pouvant également être souillées. Cependant, au regard des installations de production d'eau potable à simples filière et en regard des inconnues relatives aux sous-produits d'oxydation générés par l'ozonation des matières organiques; il convient de protéger notre ressource et de limiter autant que possible les apports de micropolluants dans les eaux du Léman.

En ce début du XXI^e siècle, la potabilisation des eaux superficielles s'est donc notablement complexifiée.

Fig. 7. Pesticides totaux dans les eaux avant et après traitements pour la production d'eau potable (d'après Edder et al. 2006) dans différentes régions du lac: Vevey, Evian, Nyon.
 Fig. 7. Total pesticides in raw and treated waters from selected drinking water treatment stations (adapted from Edder et al 2006) in various lake areas: Vevey, Evian, Nyon.

La contrainte de devoir s'affranchir d'une palette élargie de substances anthropiques à très faibles concentrations et dont les dimensions ne sont plus de



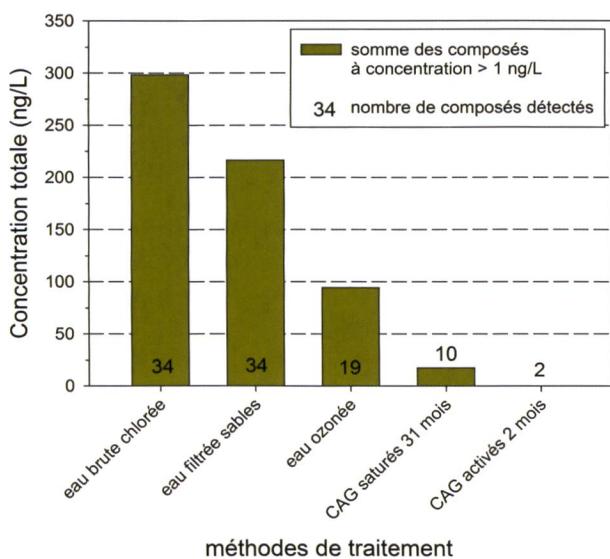


Fig. 8. Teneurs totales et nombre de substances mises en évidence (parmi 200 matières actives recherchées) en herbicides et fongicides à la station de potabilisation du Prieuré (Genève) en juin 2005, la filière de traitement est celle mentionnée au tableau 2. (CAG: charbon actif granulé)

Fig. 8. Total concentrations and number of detected herbicides and fungicides (out of 200 searched substances) at the drinking water treatment station of Geneva (Prieuré) in June 2005.

Treatment process is presented in table 2. (CAG: granular activated carbon)

l'ordre de la particule (microscopique) mais celles de petites molécules (nanométriques) nous contraintent à reconsidérer un des objectifs énoncés par la CIPEL à sa création en 1962; «possibilité d'utiliser les eaux du lac pour la production d'eau de consommation après les traitements actuellement appliqués»; à l'époque, les «traitements actuels», signifiaient essentiellement une filtration sur sable et une désinfection... Force est de constater que l'état de la technique s'est complexifié!

■ 7. Prospectives

Les nouvelles méthodes d'analyses, de plus en plus sensibles et capables de détecter des substances aux propriétés physico-chimiques très différentes, permettent maintenant aux scientifiques de développer des plans de surveillance beaucoup plus ambitieux. De nombreux nouveaux micropolluants seront très probablement décelés dans les eaux du Léman, de ses affluents, dans les sédiments et dans la chair des poissons. Le véritable défi du futur sera donc d'une part d'interpréter ces résultats et d'autre part de lutter pour diminuer les apports en micropolluants dans les écosystèmes. Le but ultime étant d'éviter de futures pollutions majeures de substances toxiques et persistantes, comme le sont les dioxines et PCB de type dioxine (PCBdL).

7.1. Interpréter les résultats

Ceci constituera le principal défi de la décennie. Il faudra absolument harmoniser, voire normaliser, les procédures des tests écotoxicologiques et surtout produire des données qui soient disponibles aux scientifiques et aux autorités de surveillance. Dans ce cadre, il faut bien avouer que les méthodologies de ces tests sont extrêmement lourdes en temps et en coûts et sont encore essentiellement basées sur l'expérimentation animale. Il y a, dans ce domaine, un potentiel d'évolution considérable et le développement de nouvelles approches deviendra indispensable pour déterminer le danger que représenteront toutes les substances présentes dans notre environnement.

L'évaluation du danger ne se fait actuellement que par substance individuelle. Or, des dizaines, voire centaines de produits d'origine anthropique sont aujourd'hui présents dans notre environnement. Peut-on encore considérer ces micropolluants comme des molécules dont les effets sont dissociées les uns des autres? Non, et nous le savons bien. Le résultat peut être une annulation, une diminution ou une additivité des effets, voire même une action synergétique. Ces propriétés sont bien connues dans le domaine des médicaments ou des produits phytosanitaires, où les formulations proposent maintenant souvent des mélanges de plusieurs matières actives. Des approches sur les effets antagonistes et synergétiques des mélanges de substances sont développés pour résoudre cette question essentielle (cf. Chèvre et al. 2008).

Il est primordial d'arriver à mieux caractériser les dangers et les risques de manière à parvenir à une gestion des risques qui soit réaliste et proportionnelle. Il n'est pas possible de se retrancher systématiquement derrière le principe de précaution et un appui scientifique sûr reste indispensable.

7.2. Eviter les pollutions dues aux substances organiques persistantes

Un des autres défis majeurs à relever consiste à identifier pour éviter, ou tout du moins limiter, les apports de polluants organiques persistants susceptibles de se bio-accumuler dans les organismes vivants. Il est absolument nécessaire de tirer les leçons de l'expérience acquise avec les pollutions dues aux PCB. En effet, nous savons maintenant qu'une fois entré dans le milieu naturel, ce type de substances est quasiment impossible à éliminer, provoquant de graves problèmes écologiques et finissant par se retrouver dans nos assiettes dans les denrées alimentaires d'origine animale par des phénomènes de bio-amplification. Si, pour les PCB, il existe encore du travail à réaliser quant à la compréhension des processus de

distribution et de leur diffusion au sein de l'environnement, il y a surtout un défi pour prévenir l'apparition de situations identiques dues à d'autres polluants à caractéristiques similaires.

Certaines substances de ce type ont déjà été identifiées dans notre environnement, en Suisse et dans le monde; les PBDE et les substances perfluorées. Les PBDE sont des substances chimiques d'origine humaine ajoutées à divers produits de consommation tels que plastiques, équipements électriques et électroniques ou encore dans le mobilier pour les rendre moins susceptibles de s'enflammer. Les PBDE peuvent être libérés lentement de ces produits, mais de manière continue, lors de leur fabrication, de leur utilisation ou après leur élimination. En raison de leur caractère lipophile, ils peuvent se retrouver en concentration plus élevée dans les graisses animales comme les poissons. Ces substances se comportent en fait de manière très similaire aux PCB.

Les substances perfluorées, dont le perfluorooctane sulfonate (PFOS) est le représentant principal, sont utilisés principalement dans les produits hydrofuges, antitaches et imperméables aux graisses. La plupart des perfluoroalkyl sulfonates sont susceptibles de se dégrader en PFOS dans l'environnement. Le PFOS est une substance très persistante (demi-vie estimée à 41 ans) et se bio-accumule facilement dans certains organismes, notamment en se fixant sur les protéines.

Ce potentiel de persistance et de bio-accumulation de ces composés a été clairement mis en évidence et récemment détectés dans les poissons du Léman (AFFSA 2005, Edder et al. 2009, 2013). Si le comportement des PBDE paraît très proche de celui des PCB, les substances perfluorées semblent avoir des propriétés différentes, conférées par leur plus grande solubilité dans l'eau et leur capacité à se lier aux protéines. Ainsi, contrairement aux PCB et PBDE contaminant principalement les poissons à forte teneur en lipides tels les omble chevaliers, toutes les espèces de poissons, perches y comprises, présentent des teneurs non négligeables en substances perfluorées (Tableau 3).

Dans les deux cas cependant, la difficulté actuelle demeure encore une fois dans l'évaluation des dangers. En effet, il existe encore de nombreuses incertitudes quant à la toxicité de ces substances, pour l'homme et l'environnement, et c'est pourquoi, à l'heure actuelle, il n'y a encore aucune réglementation à caractère environnemental ou alimentaire (EFSA 2008, AFFSA 2005). Avec une évaluation toxicologique plus sévère, des surprises telles celles apportées par les PCB (de type dioxine) ne sont pas du tout exclues. Il existe déjà, par exemple, des doutes quant aux effets du congénère 99 des PBDE en tant que perturbateur endocrinien ayant peut-être des impacts sur la diminution de la fertilité masculine (AFSSA 2005; de Winter-Sorkina et al. 2006). Des études sont en cours un peu partout dans le monde, mais il conviendrait déjà de prendre certaines précautions; car, à l'instar des PCB, il sera bien difficile de les éliminer de notre environnement s'il s'avérait qu'ils représentent un réel danger. Il s'agit donc, pour les autorités, de se soumettre à l'exercice périlleux de la pesée d'intérêts entre principe de précaution et alarmisme, d'autant plus que des intérêts économiques colossaux sont en jeu. Le rôle des scientifiques, consistant à fournir des informations claires aux autorités, est donc primordial et des moyens doivent absolument être mis en place pour identifier rapidement le danger et le risque liés aux PBDE et aux perfluorés en tenant compte de l'exposition globale de la population à ces substances.

7.3. Réduire les apports en micropolluants dans l'écosystème

Il existe deux axes de travail principaux et parfaitement complémentaires pour diminuer les apports en micropolluants dans notre environnement;

- Lutter à la source en interdisant ou restreignant l'utilisation de certaines substances.
- Traiter les eaux usées pour éliminer les micropolluants avant leur rejet dans le milieu naturel.

De nombreuses substances ont déjà fait l'objet d'interdiction ou de limitation, comme les PCB, le DDT et autres pesticides organochlorés. Toutefois, la ten-

Tableau 3: Substances organiques persistantes (PBDE, PFOS) détectées dans la chair de poissons en 2009 dans le lac (Edder et al 2009).

Espèce	Σ PBDE moyenne µg/kg	Σ PBDE min-max µg/kg	Σ PFOS moyenne µg/kg	Σ PFOS min-max µg/kg
Ombles chevalier (n=5)	9,0	7,0 - 13,1	40	10,0 - 94,8
Corégones (n=6)	2,0	1,5 - 2,8	56	29,9 - 75,0
Perches (n=5)*	0,63	0,55 - 0,73	48	43,3 - 51,6
Lottes (n=3)	0,84	0,27 - 1,5	13	8,1 - 21,3

* lots de 20-30 perches de tailles entre 15-20 cm

dance actuelle se veut plus dans le dialogue avec les industries que dans les interdictions par voie législative. C'est ainsi par exemple, que les principaux fabricants de PFOA se sont engagés à trouver des solutions de rechange et à ne plus utiliser cette substance d'ici 2015. En 2010 déjà, de nombreuses utilisations de cette substance ont disparu et les apports dans l'environnement devraient commencer à diminuer ces prochaines années. Il existe cependant un long temps de latence entre les mesures prises et l'observation d'une vraie diminution des intrants (OFEV 2009). Cet exemple illustre également très bien l'inertie du système et le besoin d'avoir rapidement des bases scientifiques sûres pour entamer le dialogue avec les industries. Le facteur temps est lui aussi primordial pour que de nouvelles catastrophes type PCB soient évitées.

La lutte à la source reste primordiale lorsque des produits polluants sont directement dispersés dans l'environnement. On pense principalement à l'utilisation des produits phytosanitaires, que ce soit dans les pratiques agricoles professionnelles ou privées, aux médicaments vétérinaires qui sont excrétés directement dans les champs, aux biocides utilisés dans le traitements de surfaces en milieu urbain et qui peuvent être lessivés et finir dans les réseaux d'eaux claires.

Dans la majeure partie des cas, il ne s'agit pas forcément d'interdire, mais de limiter les usages de produits polluants. Dans ce cadre, la formation des professionnels et l'information au grand public sont des outils capitaux. L'agriculture est un exemple où de très grands progrès ont été obtenus ces 20 dernières années et les agriculteurs sont aujourd'hui formés à utiliser moins et mieux les pesticides; ils sont aussi instruits aux nouvelles pratiques de lutte biologique comme par exemple la confusion sexuelle qui permet d'éviter l'usage d'insecticides. La plupart sont désormais sensibilisés à la problématique des micropolluants. Pour le grand public, il existe encore un immense travail d'information à réaliser; souvent celui-ci ne connaît pas les produits qu'il utilise ni ne sait comment les éliminer après usage. Il est donc important de lui apporter de l'information qui lui permette d'identifier les produits à risque et ainsi d'en faire usage avec discernement. Il s'agit aussi de lui permettre de faire ses choix de consommation en connaissance de cause.

Cependant la lutte à la source n'est pas possible dans tous les cas, du moins pas à courte échéance. Certaines substances susceptibles de poser des problèmes (impacts sur la santé humaine ou environnementaux) sont indispensables et ne peuvent être interdites ou limitées du jour au lendemain sans solution de rechange. On peut citer par exemple

certains médicaments ou même penser aux retardateurs de flamme (les PBDE) qui permettent de sauver des vies.

Si l'usage de ces substances ne peut être évité, la seule option pour diminuer leurs rejets dans l'environnement reste leur élimination lors du processus de traitement des eaux usées. Différents projets sont en cours en Europe à l'heure actuelle. Nous pouvons en citer deux importants; le projet AMPERE en France et le projet «Stratégie MicroPoll» en Suisse.

Le projet AMPERE consiste à étudier les capacités des STEP existantes pour l'abattement des micropolluants. Le but est de dégager des solutions pour optimiser les systèmes existant afin d'éliminer un maximum de micropolluants organiques.

Le projet «Stratégie MicroPoll» de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) est plus ambitieux puisqu'il exige la mise au point d'une étape de traitement supplémentaire (dite quaternaire) des eaux usées dédiée spécifiquement à l'élimination des micropolluants organiques. La stratégie consiste à s'inspirer des procédés de traitement de l'eau potable avec ozonation et filtration sur lits de charbons actifs, et de les appliquer aux eaux usées. La Confédération Helvétique prévoit de rendre obligatoire cette étape quaternaire pour une centaine des plus grandes STEP du pays (Abegglen et Siegrist 2012).

Il n'y a donc pas de panacée ni de solutions miracles; il existe cependant de nombreuses pistes à suivre pour améliorer notre connaissance de ces micropolluants relativement à la santé humaine et à l'environnement. Ceci devrait permettre la mise en place d'une gestion plus adaptée des risques et de promouvoir ou d'exiger des actions efficaces pour restreindre les apports en micropolluants dans notre écosystème lacustre et de léguer aux générations futures un Léman autour duquel il fera bon vivre, aussi bien pour la biocénose que pour nos descendants.

L'homme, qui par ses interactions avec son environnement s'est placé au sommet de la pyramide écologique, ne peut désormais plus se permettre de déranger les étages inférieurs de cet édifice. Ces perturbations pourraient à plus ou moins long terme se répercuter sur ce qu'il a de plus précieux, de plus beau et de plus fragile aussi; sa capacité à donner la vie.

Références

- **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.
- **AFSSA** 2005 - Afssa - Saisine n° 2005-SA-0090
- **BERNARD M, ARNOLD C, EDDER P, ORTELLI D.** 2007. Micropolluants dans les eaux du Rhône. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 163-172.
- **BERNARD M, ARNOLD C.** 2008. Micropolluants dans les eaux du Rhône. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 139-148.
- **BERNARD M, ARNOLD C.** 2009. Micropolluants dans les eaux du Rhône. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 145-155.
- **BUWAL** (1999) Stoffe mit endokriner Wirkung in der Umwelt, Schriftenreihe Umwelt Nr 308, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) und dem BUWAL, Bern 1999.
- **CHEMICAL ABSTRACT SERVICES.** 2013. <https://www.cas.org/>
- **CHEVRE N.** 2006. Pestizide in Schweizer Oberflächengewässern, Gas Wasser Abwasser, 4: 297-307.
- **CHEVRE N, EDDER P, ORTELLI D, TATTI E, ERKMAN S, RAPIN F.** 2008. Risk assessment of herbicide mixtures in a large European lake. Environmental toxicology. 23 : 269-277.
- **DAVIS DL, WEBSTER P, STAINHORPE H, CHILTON J, JONES L, DOI R.** 2007. Declines in sex ratio at birth and fetal deaths in Japan, and in U.S. whites but not african americans. Environmental Health Perspective, 115 : 941-946.
- **EDDER P, ORTELLI D, RAMSEIER S.** 2006. Métaux et micropolluants organiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 65-87.
- **EDDER P, ORTELLI D, RAMSEIER S, CHEVRE N.** 2007. Métaux et micropolluants organiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 59-81.
- **EDDER P, ORTELLI D, KLEIN A, RAMSEIER S.** 2008. Métaux et micropolluants organiques dans les eaux et sédiments du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 57-84.
- **EDDER P, ORTELLI D, RAPIN F, RAMSEIER S.** 2009. Métaux et micropolluants organiques dans les eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 59-71.
- **EDDER P, ORTELLI D, KLEIN A.** 2013. Micropolluants dans plusieurs espèces de poissons du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2012, 70-81.
- **EFSA** 2008 http://www.efsa.europa.eu/efsa_locale-1178620753816_1211902012410.htm
- **EUROPEAN COMMISSION.** 2003. Technical Guidance Document on Risk Assessment. TGD Part II. Institute for Health and Consumer Protection, European Chemicals Bureau, European Commission (EC), Ispra, Italy.
- **GARRIC J, FERRARI B.** 2004. Les substances pharmaceutiques dans les écosystèmes aquatiques : présence, comportement et impact. Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural. 99: 47-58.
- **GOLLET E, ALDER AC, GIGER W.** 2002. Environmental exposure and risk assessment of fluoroquinolone antibacterial agents in wastewater and river water of the Glatt valley watershed, Switzerland. Environmental Science and Technology, 36: 3645-3651.
- **HALLING-SORENSEN B, HOLLEN-LUTZHOFT H-C, ANDERSEN HR, INGESLEV F.** 2000. Environmental risk assessment of antibiotics : comparison of mecillinam, trimethoprim and ciprofloxacin. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, Suppl. S1: 53-58.
- **LOIZEAU J-L, EDDER P, DE ALENCASTRO LF, CORVI C, RAMSEIER GENTILE S.** 2013. La contamination du Léman par les micropolluants- revue de 40 ans d'études. Archives des sciences 66 : 117-136.
- **OFEV** (2009) Substance flow analysis for Switzerland: Perfluorinated surfactants perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA), OFEV 22-09.
- **ORTELLI D, EDDER P, RAPIN F, RAMSEIER S.** 2010. Métaux et micropolluants organiques dans les rivières et les eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2009, 57-76.
- **RAMSEIER S.** 2003. Qualité des eaux potables produites à partir du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., campagne 2002, 123-138.
- **RAPIN F, GERDEAUX D.** 2013. La protection du Léman, priorité à la lutte contre l'eutrophisation. Archives des sciences. 66 : 103-116.
- **DE WINTER-SORKINA R, BAKKER MI, WOLTERINK G, ZEILMAKER MJ.** 2006. Brominated flame retardants: occurrence, dietary intake and risk assesment – RIVM 2006 Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) report 320100002/2006, <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/320100002.html>
- **VON GUNTEN U.** 2008. Une eau potable de qualité – une évidence ? EAWAG news 65f: 4-7.

