

**MODELISATION DU FLUX DE MICROPOLLUANTS ISSUS DES REJETS DES
STATIONS D'EPURATION DANS LE TERRITOIRE DE LA CIPEL
(BASSINS DU LÉMAN ET RHÔNE AVAL)**

**MODELING OF MICROPOLLUTANT FLOWS DISCHARGED FROM SEWAGE
TREATMENT PLANTS IN THE CIPEL TERRITORY
(PONDS OF LAKE GENEVA AND UPSTREAM RHONE BASINS)**

CAMPAGNE 2013

PAR

Suzanne METTLER et Christian GÖTZ

ENVILAB AG - Mühlethalstrasse 25, CH - 4800 ZOFINGEN

Etienne VERMEIRSEN

CENTRE ECOTOX EAWAG-EPFL - Überlandstrasse 133, CH - 8600 DÜBENDORF

Audrey KLEIN

SECRETARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN

ACW - Changins - Bâtiment DC, CP 1080, CH - 1260 NYON 1

RÉSUMÉ

A l'échelle du territoire de la CIPEL, près 2.3 millions d'habitants rejettent quotidiennement des micropolluants via l'utilisation de certains produits cosmétiques, ménagers ou médicaments. Ces substances vont rejoindre les milieux aquatiques après avoir transité par pas moins de 218 stations d'épuration (STEP). Leur présence dans les eaux est une préoccupation majeure de la CIPEL.

La CIPEL et l'OFEV ont souhaité évaluer, sur le territoire de la CIPEL, le degré de contamination des eaux de surface (lac et cours d'eau) par les micropolluants provenant des rejets d'eaux usées domestiques et évaluer le succès des mesures de réduction qui pourraient être prises au niveau des STEP, comme l'installation d'un traitement quaternaire par ozonation ou par dosage de charbon actif en poudre.

Pour les rivières, un modèle de calcul a permis d'estimer les concentrations en période d'étiage en chaque point de rejet d'eaux usées et de les comparer à des critères de qualité écotoxicologique, afin d'identifier les cours d'eau particulièrement contaminés nécessitant des mesures prioritaires d'assainissement.

Le système lacustre a été traité à l'aide d'un bilan des flux dans le lac et a permis de pronostiquer l'évolution des charges accumulées dans le Léman.

Enfin, trois scénarios de réduction des flux de micropolluants issus des rejets de STEP, associés à des coûts de traitement, ont permis d'illustrer l'effet de différentes stratégies d'équipement des STEP, à la fois en terme de charges en micropolluants dans les eaux, et d'amélioration de la qualité écotoxicologique des cours d'eau.

Les résultats de cette étude font l'objet d'une synthèse présentée dans ce rapport. Ils pourront servir d'aide à la décision en Suisse comme en France pour des actions de lutte et de réduction des micropolluants dans les eaux.

SUMMARY

Over the CIPEL territory, nearly 2.3 million people discharge daily micropollutants via the use of cosmetics, household products or drugs. These substances enter aquatic environments after passing through no less than 218 wastewater treatment plants (WWTP). Their presence in water is a major concern of CIPEL.

CIPEL and FOEN wanted to assess in 2013, the degree of contamination of surface water (lakes and rivers) by micropollutants from the discharge of domestic waste water and evaluate the success of mitigation measures that could be taken at WWTP, such as the installation of a quaternary ozonation treatment or dosage of powdered activated carbon.

For rivers, a calculation model was used to estimate the concentrations at low water at each point of wastewater discharge and compared them to ecotoxicological quality criteria to identify waterways particularly contaminated requiring priority remediation.

The lake system was treated using the flows in the lake, which helped to predict the trend of loads accumulated in Lake Geneva.

Finally, three scenarios to reduce the flow from WWTP micro-discharges, associated treatment costs, were used to illustrate the effect of different WWTP equipment strategies, both in terms of micropollutant discharge in waters and improving the quality of ecotoxicological streams.

The results showed that the solution is complex and cannot be solved globally by equipping a certain number of WWTP. Instead, they suggest illustrating the particularly problematic cases that can serve as decisional support in Switzerland and France for control actions and reduce pollutants in surface waters.

1. INTRODUCTION

La présence de micropolluants dans les eaux du bassin versant lémanique et du lac est une préoccupation majeure de la CIPEL. Dans le Léman, les pesticides font l'objet d'un suivi régulier depuis 2004 (RAMSEIER et al, 2014). Dès 2005, certains résidus médicamenteux sont également régulièrement mesurés et depuis 2013, un suivi régulier étendu à 58 substances a été mis en place. Ces campagnes ont notamment permis de révéler un apport de substances dans le Léman par les industries établies dans la vallée du Rhône. Des mesures ont été mises en place et leur effet est suivi par des analyses régulières dans le Rhône ciblant les produits en question (BERNARD et al 2014).

Différentes études ont montré que les rejets des STEP peuvent conduire à des concentrations marquées de micropolluants dans les milieux aquatiques, notamment lorsqu'ils sont déversés dans des cours d'eau de faible débit, détériorant ainsi la qualité des eaux (Morasch B., 2010; Ruhrverband, 2009; Götz, et al., 2011; IKS, 2010).

L'industrie, l'agriculture ainsi que les résidus de micropolluants provenant de la population par la consommation de médicaments et l'utilisation de produits ménagers et cosmétique est une source importante de micropolluants détectés dans les eaux. Les eaux usées domestiques rejetées après traitement dans les milieux aquatiques, emportent avec elles tout un cocktail de micropolluants qui n'ont pu être que partiellement éliminés par les filières classiques d'épuration.

Sur le territoire de la CIPEL, des suivis de micropolluants effectués sur plusieurs STEP permettent de caractériser les flux de certaines substances vers les milieux aquatiques (CONDAMINES, 2014).

2. CARACTERISTIQUES DU TERRITOIRE ETUDIE

Le territoire étudié comprend les bassins versants du Léman et du Rhône aval (Figure 1).

En 2011, le bassin versant du Léman compte 1,335 millions d'habitants raccordés pour 168 STEP ; celui du Rhône aval en dénombre 950'000 pour 50 STEP.

Le rapport sur le fonctionnement des STEP donne plus de détails sur les caractéristiques des STEP étudiées (CONDAMINES, 2014). Notons que 19 STEP (570'000 habitants au total) déversent leurs effluents directement dans le Léman.

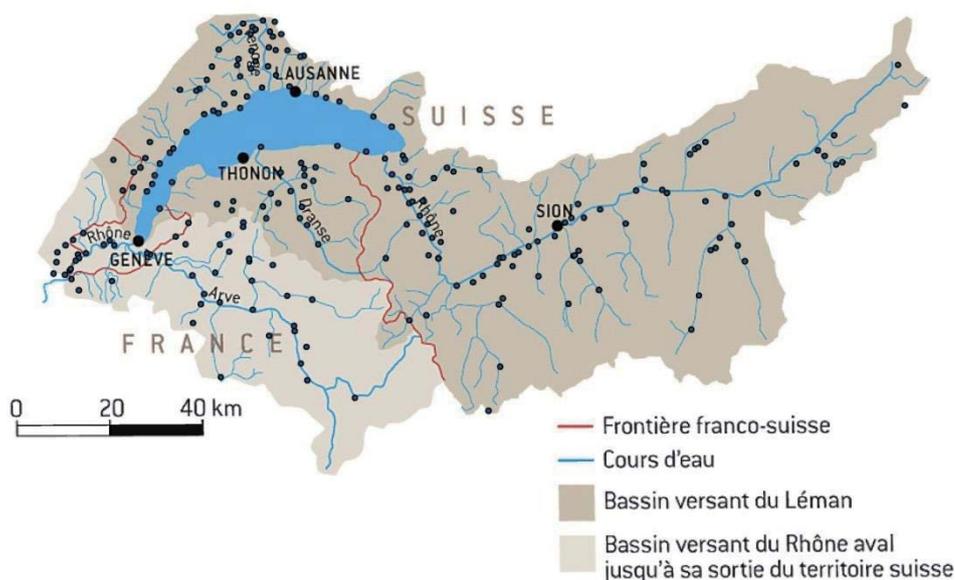


Figure 1 : Répartition de l'ensemble des STEP sur le territoire étudié.

Figure 1 : Distribution of all WWTP in the study area.

3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude réalisée en 2013 par Envilab sur mandat de la CIPEL et de l'OFEV fait l'objet d'une synthèse présentée dans ce rapport. L'étude vise deux grands objectifs :

1. évaluer à l'échelle du territoire de la CIPEL, le degré de contamination des eaux de surface (lac et cours d'eau), par les micropolluants provenant des rejets d'eaux usées domestiques ;
2. évaluer le succès des mesures de réduction qui pourraient être prises au sein des stations d'épuration, comme l'installation d'un traitement par ozonation ou par dosage de charbon actif en poudre.

Les résultats de cette étude pourront servir d'aide à la décision en Suisse comme en France pour des actions de lutte et de réduction des micropolluants dans les eaux. Ces résultats vont aider à la mise en œuvre de la révision de la Loi sur la protection des eaux (LEaux) en Suisse, ainsi qu'à la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau (DCE) en France.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 SÉLECTION DE SUBSTANCES INDICATRICES PERTINENTES

Les données issues des suivis effectués dans les cours d'eau du bassin lémanique et le lac ont été consultées afin de sélectionner les substances qui semblent être particulièrement problématiques en raison de leur concentration élevée et de leur occurrence répétée.

Compte-tenu des restrictions des modèles utilisés, les substances indicatrices sélectionnées doivent remplir les critères suivants :

- les substances considérées ont été détectées en concentrations mesurables et de façon répétée dans les eaux du bassin lémanique ;
- elles proviennent essentiellement des rejets d'eaux usées urbaines ;
- elles sont rejetées avec les eaux usées de manière continue dans le temps et l'espace et non suite à des événements ponctuels tels que les précipitations, et ne sont pas concentrées sur un seul lieu (industries, hôpitaux) ;
- les données de consommation, leur métabolisme dans le corps ainsi que leur taux de dégradation biologique en STEP sont connus ou, à défaut, il est possible d'estimer les rejets dans les cours d'eau à partir des concentrations mesurées en sortie de STEP ;
- enfin, elles sont mobiles, hydrophiles, très solubles, ne s'adsorbent pas et sont très peu ou pas dégradables.

A contrario, les catégories de substances suivantes ont été écartées :

- les biocides utilisés typiquement pour les revêtements extérieurs (façades, toits plats, bois, ...) et les pesticides qui sont généralement déversés dans les eaux lors de précipitations car ces substances ne remplissent pas les critères susmentionnés (pas de déversement continu, consommation inconnue) ;
- les agents contrastants, car ils ne sont pas déversés uniformément dans le bassin versant, mais dépendent fortement des pratiques hospitalières régionales, certains instituts utilisant plutôt l'une ou l'autre de ces substances ;
- les agents plastifiants, ignifuges et autres additifs, dont les consommations sont généralement difficiles à estimer ; en outre, certaines substances comme les phtalates ne sont pas mobiles (sorption).

Pour la modélisation du flux de micropolluants rejetées dans les cours d'eau, les 13 substances retenues sont : l'acésulfame, l'aténolol, le benzotriazole, la carbamazépine, le métabolite de la carbamazépine (carbamazépine-10,11-dihydro-10-dihydroxy), la clarithromycine, le diclofénac, la gabapentine, l'acide méfénamique, la metformine, le métoprolol, le nonylphenol et le sulfaméthoxazol.

Pour la modélisation du bilan des charges dans le lac, la sélection a été réduite à quatre de ces substances, lesquelles ont été quantifiées à des concentrations relativement élevées dans les eaux du Léman : benzotriazole, carbamazépine, metformine, gabapentine.

4.2 DÉFINITION DES MODÈLES UTILISÉS

Le système d'évaluation de la qualité des eaux appliqué au bassin lémanique, a été élaboré et appliqué précédemment sur le lac de Constance sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (Götz, 2011).

Le modèle ne tient pas compte d'éventuels phénomènes de dégradation ou de sorption dans le milieu et ne peut donc être appliqué qu'à des substances quasi-persistantes et bien solubles. C'est d'ailleurs à cause de leur persistance que les polluants provenant des eaux usées domestiques sont problématiques.

A l'échelle des cours d'eau, le modèle procède en additionnant les charges de pollution rejetées dans les eaux par le biais des effluents d'épuration (v. chap. 4.3, Eq. 2). Il permet de calculer des concentrations en période d'étiage en chaque point de rejet d'eaux usées (v. chap. 4.3, Eq. 3) et de les comparer à des critères de qualité écotoxicologique (v. chap. 4.5), afin d'identifier les cours d'eau particulièrement contaminés nécessitant des mesures prioritaires d'assainissement.

Les données requises pour le modèle sont les suivantes :

- réseau hydrographique : typologie des cours d’eaux, débits minimums d’écoulement aux points de rejet ou juste en contrebas ;
- réseau d’épuration : nombre d’habitants raccordés, taux d’élimination en station d’épuration pour les substances considérées et, si disponibles, mesures des concentrations en sortie de STEP ;
- consommation humaine des substances examinées, fraction non métabolisée de la substance qui gagne la canalisation après consommation (v. chap. 4.3, Tableau 3).

A l’échelle du lac l’impact des rejets de micropolluants ne peut pas être évalué par la même approche que celle appliquée au cours d’eau du fait des particularités et de la complexité que présente ce dernier (durée de résidence, stratification, etc.). Le système lacustre a été traité à l’aide d’un bilan des flux (les charges entrantes et sortantes sont régulées uniquement par un équilibre des flux). Sur cette base, le bilan permet de pronostiquer l’évolution des charges accumulées dans le Léman.

Le bilan des flux du lac a été effectué à l’aide du programme MASASlight1 représentant le lac comme un seul compartiment (pas de stratification). Il ne permet donc pas de simuler des zones riveraines du lac affectées par des phénomènes locaux.

Le modèle utilise en données d’entrée les flux calculés par la modélisation des flux de micropolluants dans les cours d’eau, c’est à dire la somme des charges déversées par les effluents de STEP et cumulées dans chaque cours d’eau, ou déversées directement, si le lac est l’exutoire de la STEP en question. Le tableau 1 résume les flux ainsi calculés pour toutes les substances (y compris celles non considérées dans le bilan du lac).

Tableau 1 : Total des charges de substances indicatrices déversées via les effluents de STEP dans le lac Léman (valeurs calculées à l’aide du modèle à l’échelle des cours d’eau). Le bilan du lac a été effectué pour les substances indiquées en gras.

Table 1 : Total loads of indicator substances discharged via WWTP effluent into Lake Geneva (values calculated using the scaled model of the river). The report of the lake was made for substances in bold.

Flux des substances dans le lac			
kg/a		CH	F
Acésulfame	édulcorant	3'273	399
Aténolol	bétabloquant	86	10
Benzotriazole	Agent anti-corrosif	751	92
Carbamazépine	Anti-épileptique	49	5
Di-hydroxy-carbamazépine	Métabolite carbamazépine	158	16
Clarithromycine	antibiotique	39	5
Diclofénac	analgésique	137	10
Gabapentine	Anti-épileptique	304	67
Acide méfénamique	analgésique	116	0.2
Metformine	Anti-diabétique	2'674	463
Metoprolol	bétabloquant	34	1
Iso-nonylphénol	additif	111	14
Sulfaméthoxazole	antibiotique	37	3

¹ MASASlight Modeling Anthropogenic Substances in Aquatic Systems de Markus Ulrich, Eawag Dübendorf

Le bilan des flux lacustres peut être représenté par la formule générale (Schwarzenbach, et al., 1993) :

$$\frac{dM}{dt} = Y_M - k \cdot M$$

Cette équation décrit l'évolution de la quantité de substance stockée dans le lac, M , en fonction du temps t ; elle est déterminée par le flux de substance entrant (Y_M) ainsi que par la constante d'élimination k . La valeur de k est inversement proportionnelle au temps moyen de résidence des eaux dans le lac ($k = 2/11,3 \text{ ans}^{-1}$)².

La durée jusqu'à atteindre 95% de la situation d'équilibre (« steady state ») découle de la constante d'élimination k ($t_{ss} = 3 / k$).

4.3 CALCUL DES CHARGES DÉVERSÉES ET DES CONCENTRATIONS DANS LES MILIEUX AQUATIQUES

Charges déversées

Pour les STEP suisses, la charge moyenne par habitant et par jour est calculée pour chacune des substances étudiées, sur la base :

- des données de consommation combinées à des informations sur le comportement de la substance (métabolisme dans le corps, élimination dans les STEP) ;
- des concentrations mesurées en sortie de STEP (en écartant les valeurs influencées par un rejet industriel important).

Pour les STEP françaises, pour lesquelles peu de données de suivi existent un facteur de correction a été appliqué aux valeurs suisses pour tenir compte des habitudes de consommation en France.

Ces valeurs sont résumées dans le tableau 2.

Concentrations dans les milieux aquatiques

Les valeurs de concentrations sont obtenues en divisant les charges cumulées par le débit du cours d'eau, lorsqu'il est connu. En l'occurrence, le débit minimal d'écoulement annuel (QMNA₅, pour la France ; Q₃₄₇, pour la Suisse) a été choisi comme débit de référence afin d'illustrer des conditions défavorables mais réalistes, telles qu'on peut les rencontrer chaque année, en période d'étiage.

Dans la région concernée, s'ajoutent périodiquement aux conditions d'étiage, une augmentation de la population raccordée due à l'arrivée de la population saisonnière (tourisme hivernal). L'étude a montré un impact non négligeable dans certaines régions de la population saisonnière sur la qualité des cours d'eau. Pour cette raison, la synthèse présente les résultats obtenus en tenant compte de la population raccordée totale (permanente et saisonnière).

En résumé, la charge en sortie de chaque station d'épuration (F_{subst}) et la concentration dans le milieu récepteur (C_{subst}) sont calculées de la façon suivante :

$$F_{subst} = M.H \quad (\mu\text{g.j}^{-1})$$

$$C_{subst} = \frac{F_{subst}}{Q} \quad (\mu\text{g.L}^{-1})$$

Avec :

M , la charge de substance par habitant déversée par la station d'épuration calculée sur la base du tableau 2 ($\mu\text{g.hab}^{-1}.\text{j}^{-1}$).

H , le nombre d'habitants raccordés à la station d'épuration.

Q , le débit minimal d'écoulement annuel QMNA₅, pour la France ; Q₃₄₇, pour la Suisse (L.j^{-1}).

² Le facteur 2 est un facteur de correction qui prend on en compte, d'une part, que le lac ne subit pas de brassage complet régulier et, d'autre part, que contrairement aux flux d'eaux introduits majoritairement par le Rhône, des charges importantes de micropolluants sont déversées en des points plus proches de l'exutoire et ont, de ce fait, un temps de résidence moindre.

Tableau 2 : Charges de micropolluants en sortie de STEP utilisées comme données d'entrée dans le modèle.

Table 2 : Micropollutant loads from WWTP used as inputs in the model.

Substance	Donnée d'entrée du modèle pour les STEP suisses ($\mu\text{g.hab}^{-1}.\text{j}^{-1}$)	Donnée d'entrée du modèle pour les STEP françaises ($\mu\text{g.hab}^{-1}.\text{j}^{-1}$)
acésulfame	10'328	10'328
aténolol	267	250
benzotriazole	3'230	3'230
carbamazépine	136	112
Carbamazépine -10,11-dihydro-10-37dihydroxy	514	425
clarithromycin	121	137
diclofénac	289	166
gabapentine	878	1'591
acide méfénamique	341	5
metformine	7'695	10'914
métoprolol	132	34
nonylphenol, iso-	181	181
sulfaméthoxazol	117	86

4.4 VALIDATION ET SENSIBILITÉ DU MODÈLE

Le calcul des charges, respectivement des concentrations dans les cours d'eau, ainsi que le calcul du risque par l'intermédiaire du quotient de risque reposent sur une application linéaire.

Les variations des paramètres d'entrée, tel que le nombre d'habitants raccordés (H), l'incertitude vis-à-vis de la quantité de substance consommée, éliminée et traitée (flux de substances par habitant, M) ainsi que le débit d'étiage du cours d'eau (Q) se reflètent de manière proportionnelle dans le résultat des calculs.

Parmi les trois paramètres (M, H et Q), ce sont le flux de substances ainsi que le débit d'étiage qui comportent les plus grosses incertitudes. Tous deux reposent sur des données moyennées et très généralisées (hypothèse d'une consommation homogène de médicaments, taux d'élimination uniforme en STEP, etc.). En réalité, la situation peut être toute autre (consommation nulle de la substance dans le bassin versant d'une STEP ; cours d'eau à sec, car dérivé pour l'usage hydro-électrique).

Le modèle présente une incertitude relative globale de 30% et n'a pas pour objectif de représenter précisément la réalité, mais plutôt de signaler là où les cours d'eau récepteurs risquent d'être particulièrement affectés par les micropolluants issus des rejets de l'épuration urbaine.

En confrontant les concentrations maximales estimées à des concentrations mesurées dans les cours d'eau, les résultats ont pu être validés. Pour toutes les substances examinées, calculs et mesures correspondent assez bien. Les valeurs s'accordent généralement mieux pour les plus grands cours d'eau, pour 2 raisons principales :

- (1) Le débit d'écoulement est plus constant et, généralement, plus fiable à mesurer
- (2) Les flux déversés proviennent d'un plus grand nombre de STEP et d'habitants raccordés, les variabilités de charge peuvent ainsi se compenser mutuellement.

Pour illustrer cette comparaison, la figure 2 montre que les charges calculées et mesurées dans le Rhône correspondent bien au moins pour leur ordre de grandeur : les points sont proches de la diagonale d'équivalence 1 : 1 ou dans le périmètre représentant un facteur deux de différence (2 : 1 ; 1 : 2).

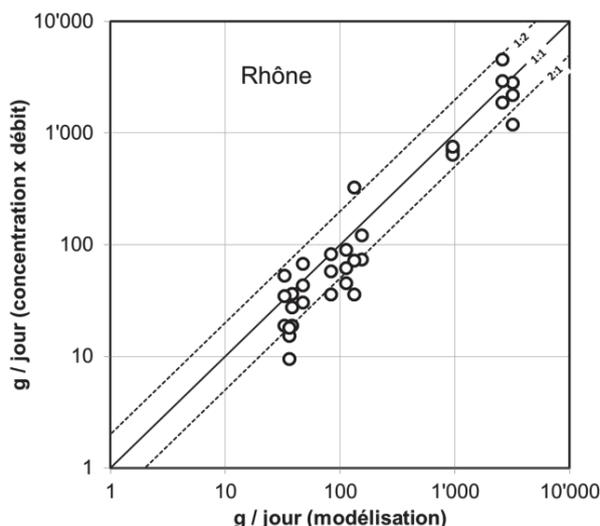


Figure 2 : Comparaison des charges prédites par le modèle à celles déterminées par des mesures (concentration et débit) dans le Rhône à la Porte du Scex.

Figure 2 : Comparison of loads predicted by the model to those determined by measurements (concentration and flow) in the Rhone at Porte du Scex.

4.5 APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ ÉCOTOXICOLOGIQUE

Dans le cas de milieux exposés à des rejets continus de micropolluants via les effluents d'épuration, la comparaison avec le critère de qualité chronique (CQC) est la démarche la plus pertinente, ce dernier ayant été conçu pour protéger les communautés biologiques d'expositions de longue durée.

L'évaluation des risques liés aux substances chimiques se fait au moyen du quotient de risque (RQ) par la comparaison d'une concentration environnementale (C_{env}) aux critères de qualité chronique (CQC) pour la substance en question, selon l'équation suivante :

$$RQ = C_{env} / CQC$$

Les valeurs de critères de qualité sont publiées sur le site du Centre Ecotox³.

Dès que le quotient de risque est égal à ou dépasse l'unité, le critère de qualité n'est plus respecté, la concentration du composé en question dans le cours d'eau présente alors un potentiel avéré de nuire à l'écosystème.

Une répartition en cinq classes d'état est adoptée, à savoir: très bon / bon / moyen / médiocre / mauvais (cf. tableau 3). L'objectif de qualité pour l'exposition à long terme (CQC) est atteint dans les classes d'état „très bon“ et „bon“ et ne l'est pas dans les trois catégories inférieures „moyen“, „médiocre“ et „mauvais“.

Il est important de noter que la méthode d'appréciation exposée ci-dessus se base sur l'évaluation des micropolluants pris isolément à l'aide du critère de qualité respectif, qui, selon la substance, peut varier de plusieurs ordres de grandeur (le quotient de risque sera donc généralement plus élevé plus le CQC est faible). La classification proposée ne tient pas compte des problèmes de toxicité des mélanges.

³ www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/vorschlaege/index_FR
Il s'agit des critères de qualité d'exposition chronique (NQE-MA)

Tableau 3 : Echelle d'appréciation du risque écotoxicologique lié aux substances chimiques à l'aide du quotient de risque (RQ) par comparaison d'une concentration environnementale (C_{env}) aux critères de qualité chroniques (CQC). Classification inspirée du module Nutriments du système modulaire gradué de l'OFEV (Götz et al. 2011).

Table 3 : Scale for assessing the ecological risk associated with chemicals with the risk quotient (RQ) compared to an environmental concentration (C_{env}) to criteria for chronic quality (CQC). Classification inspired by the Nutrients module of the FOEN stepwise modular system (Götz et al., 2011).

Appréciation ⁴		Condition/Description		Respect du critère de qualité (CQC)
Très bon		C_{env} est 10 fois inférieure au CQC	$RQ < 0.1$	CQC respecté
Bon		C_{env} est supérieure ou égale au dixième du CQC mais inférieure à ce seuil au CQC	$0.1 \leq RQ < 1$	
Moyen		C_{env} est supérieure ou égale au CQC mais inférieure au double de ce seuil	$1 \leq RQ < 2$	CQC non respecté
Médiocre		C_{env} est supérieure ou égale au double du CQC mais inférieure à dix fois ce seuil	$2 \leq RQ < 10$	
Mauvais		C_{env} est supérieure ou égale à 10 fois le CQC	$RQ \geq 10$	

4.6 CALCULS DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

L'étude de scénarios permet d'illustrer l'effet de différentes stratégies d'équipement des STEP et, en particulier, de montrer les réductions de charges en micropolluants et l'amélioration de la qualité des cours d'eau que l'on peut ainsi atteindre. La comparaison des résultats des scénarios à la situation actuelle donne une vue d'ensemble des enjeux et des difficultés spécifiques à chaque région. Dans une dernière étape, on associe des coûts aux différentes stratégies d'aménagement, ce qui permet d'estimer très grossièrement les coûts pour l'équipement et le fonctionnement des mesures envisagées.

Trois scénarios sont testés :

1. Réduction de la charge : Le scénario vise la protection des ressources et appelle au sens de responsabilité de la population située en amont vis-à-vis de la population en aval. Les mesures visent des objectifs quantitatifs de réduction de charge : l'aménagement d'une partie des infrastructures doit permettre de réduire en moyenne environ 50% (scénario 1a) et environ 80% (scénario 1b) de la charge déversée dans les milieux récepteurs.
2. Protection de l'écosystème : Ce scénario poursuit l'objectif d'éviter les concentrations problématiques dans les milieux récepteurs. Par conséquent les mesures vont consister à équiper en priorité les stations d'épuration dont les rejets entraînent des concentrations en micropolluants supérieures aux critères de qualité.
3. Stratégie suisse d'aménagement des STEP : Le scénario combine les stratégies 1 et 2 selon des critères proposés par la Confédération suisse dans le cadre de la révision de la Loi sur la protection des eaux (LEaux ; v. critères 1 à 3 du Message concernant la modification de la loi fédérale sur la protection des eaux⁵). Il prévoit l'équipement des installations de plus de 80'000 habitants raccordés, de plus de 8'000 habitants raccordés et dont les effluents représentent plus de 10% du débit du milieu récepteur ainsi que de plus de 24'000 habitants raccordés et dont les effluents sont déversés dans le bassin versant d'un lac. Ce scénario n'est calculé que pour la partie suisse du territoire de la CIPEL.

⁴ L'appréciation de l'état chimique se base sur des critères de qualité définis sur la base des effets écotoxicologiques des substances. (Annexe 1, OEaux).

⁵ Message concernant la modification de la loi fédérale sur la protection des eaux (Financer l'élimination des composés traces organiques des eaux usées conformément au principe du pollueur-payeur), 26.06.2013 : www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/31476.pdf

5. RESULTATS

5.1 CALCUL DES CHARGES REJETÉES PAR LES STEP SANS SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

Les charges des substances indicatrices déversées dans les cours d'eau ont été calculées, puis transformées en concentrations à l'aide du débit minimal d'écoulement pour 212 points situés en aval des exutoires des STEP. A noter que cette analyse n'est pas faite pour les 19 stations d'épuration qui rejettent dans le Léman et pour les exutoires pour lesquels le débit des tronçons de cours d'eau est inconnu.

5.2 APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ ÉCOTOXICOLOGIQUE

La figure 3 illustre les résultats que l'on obtient au niveau de chaque point de rejet d'épuration (exemple du diclofenac). Les cartes d'appréciation écotoxicologique pour l'ensemble des autres substances considérées figurent dans le rapport d'étude détaillé (Götz et al., 2013). Ces cartes permettent de pointer les milieux les plus affectés par les rejets de micropolluants issus des STEP mais elles ne renseignent pas sur la longueur du tronçon impacté par un ou plusieurs rejets.

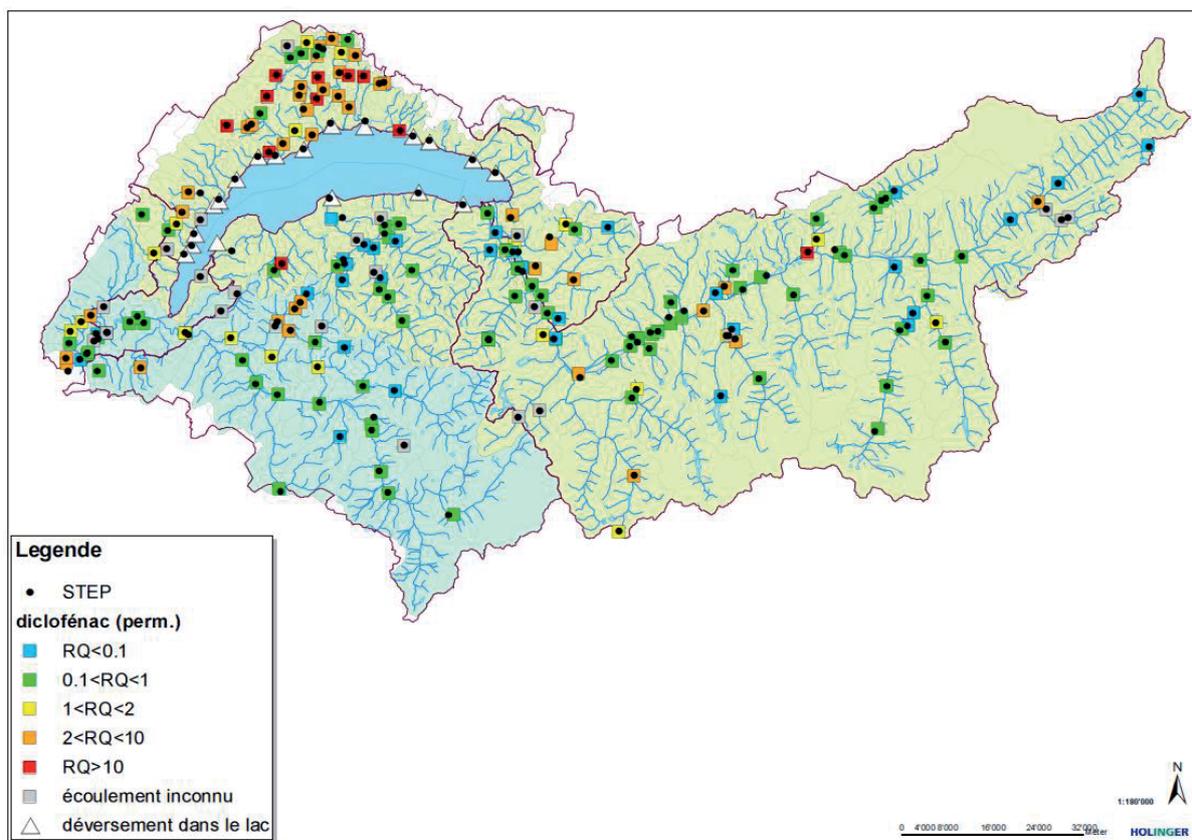


Figure 3 : Evaluation du quotient de risque (RQ) pour le diclofenac (critère de qualité chronique = 0.05 µg/L).

Figure 3 : Evaluation of Risk Assessment quotient (RQ) for diclofenac (Criterion Chronic Quality = 0.05 µg / L).

Globalement, le nombre total de dépassements du critère de qualité, toute substance confondue, est résumé dans le tableau 4. A l'échelle des 218 STEP du territoire de la CIPEL, 212 points ont pu être évalués. Parmi eux, 70 points de rejets situés en différents endroits, dépassent le critère de qualité. Ces résultats ont été obtenus en prenant en compte la population permanente raccordée aux STEP. Si l'on prend en compte la population saisonnière les chiffres doublent en Haute-Savoie et en Valais, tandis qu'à Genève, les dépassements touchent alors tous les points de rejets évalués.

Tableau 4 : Nombre de dépassements du CQC au niveau des 212 exutoires de STEP étudiés.

Table 4 : Number of exceeded CQC at the 212 wastewater treatment plants studied.

Entité	Nombre total de points de rejets évalués	Nombre de points de rejets dans le milieu récepteur avec dépassement du CQC
Ain	11	5
Haute-Savoie	55	12
Vaud	67	38
Valais	72	14
Genève	7	1
Bassin versant CIPEL	212	70

5.3 CALCUL DES FLUX DE SUBSTANCES DÉVERSÉES DANS LE LAC

Sur la base du modèle simple retenu, la figure 4 représente l'évolution des masses de substances accumulées dans le Léman sans scénario de réduction en considérant une marge d'erreur de 30%⁶ indiquée comme traitillés bleus dans la figure. Les résultats montrent que le benzotriazole, la gabapentine et la metformine se trouvent proche de l'équilibre des flux entrants et sortants. En revanche, pour la carbamazépine, la masse retenue dans le lac devrait diminuer, indiquant que le flux entrant estimé a diminué par rapport au flux passé suite aux mesures prises par une industrie.

⁶ Les marges d'erreur de 30% sont une grandeur estimée sur la base de précédents travaux où plus de mesures étaient disponibles: voir données dans les travaux réalisés pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Götz et al., 2012) ou pour la Suisse (Gälli et al. 2009).

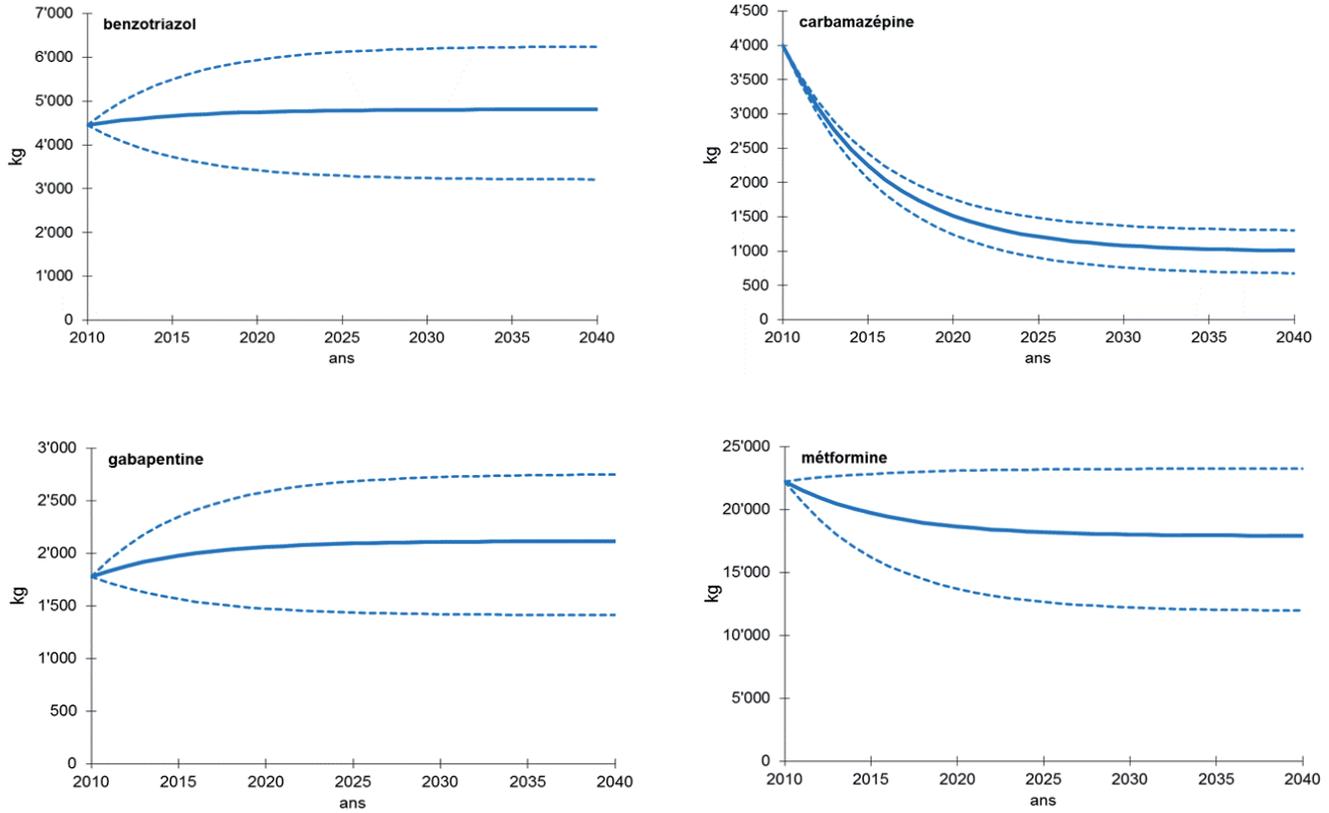


Figure 4 : Prédiction de l'évolution de la masse accumulée dans le lac si le flux entrant reste constant; les lignes en traitillés représentent un écart de 30% sur les flux entrant dans le Léman.

Figure 4 : Prediction of changes in the mass accumulated in the lake so the incoming stream remains constant; dashed lines represent a deviation of 30 % of the flow into Lake Geneva.

5.4 RÉSULTATS DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES FLUX

Les calculs effectués simulent l'effet de mesures de réduction des flux de micropolluants au niveau des stations d'épuration. Elles consistent, par exemple, en l'implémentation de traitements quaternaires, tel que l'ozonation ou le traitement au charbon actif. L'efficacité de ces traitements a pu être démontrée au cours d'expériences pilotes réalisées sur les stations d'épuration de Vidy (Lausanne) et Regensdorf (Zurich) : la plupart des substances a pu ainsi être éliminée à un taux supérieur à 80% (Margot J. *et al.*, 2013). A noter que le taux d'élimination varie selon la substance et le traitement appliqué.

Pour l'étude des scénarios, les taux d'élimination appliqués sont équivalents à la moyenne des taux obtenus par traitement quaternaire (cf. tableau 5).

Tableau 5 : Taux d'élimination appliqué dans les scénarios de réduction.

Table 5 : Degree of elimination applied in reduction scenarios.

Substance	Taux d'élimination moyen (%)
acésulfame	85
aténolol	87
benzotriazole	83
carbamazépine	97
Di-hydroxy-carbamazépine	95
clarithromycin	98
diclofénac	96
gabapentine	33
acide méfénamique	96
metformine	-
métoprolol	95
nonylphenol, iso-	95
sulfaméthoxazol	76

SCÉNARIO 1 : RÉDUCTION DE LA CHARGE

Ce scénario vise la protection des ressources et la responsabilité du riverain situé en amont. Les mesures visent des objectifs quantitatifs. Il s'agit d'équiper une partie des STEP de manière à réduire :

1a. En moyenne environ 50% de la charge déversée dans le milieu récepteur

1b. En moyenne environ 80% de charge déversée dans le milieu récepteur

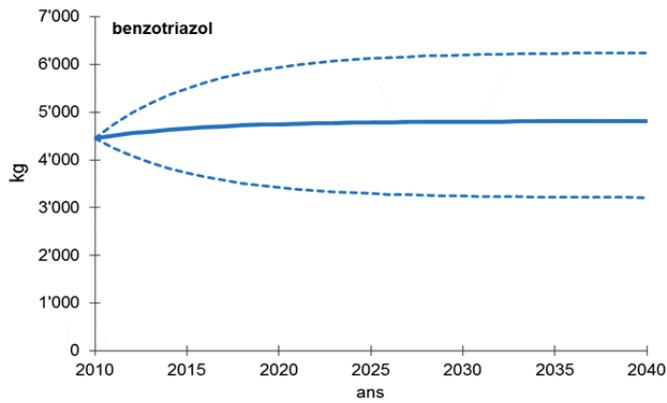
Tableau 6 : Résumé des résultats des scénarios 1a et 1b.

Table 6 : Summary of the results of scenarios 1a and 1b.

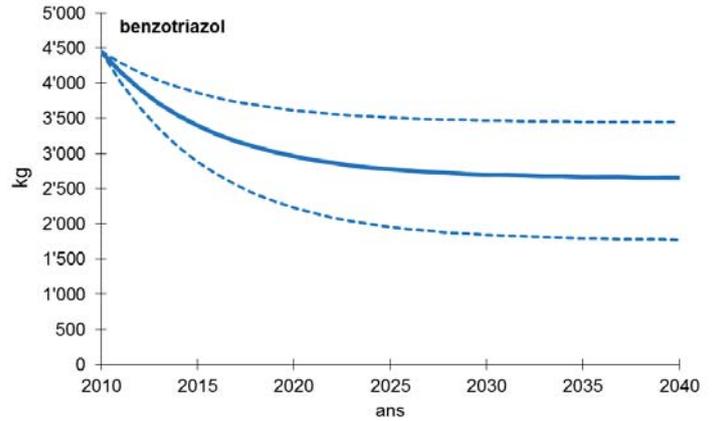
Milieu récepteur	état actuel	scénario 1a (installations >25'000 habitants raccordés)	scénario 1b (installations >5'000 habitants raccordés)
<i>Équipement des STEP</i>			
Nombre de STEP qu'il faut équiper d'une étape de traitement supplémentaire	-	20 (sur 218)	71 (sur 218)
<i>Réduction de la charge de substances (moyenne calculée)</i>			
Réduction sur l'intégralité des bassins versants étudiés	-	56%	80%
Réductions des charges rejetées dans le lac Léman	-	45%	77%
<i>Evolution du respect des critères de qualité aux points étudiés des cours d'eau récepteurs (lac non compris)</i>			
Débit non connu	12%	12%	12%
Les critères de qualité sont remplis pour toutes les substances étudiées	37%	44%	57%
Les critères de qualités sont dépassés pour une substance au moins	51%	44%	31%

Le scénario 1 (a et b) permet de diminuer efficacement les charges des substances rejetées dans les bassins considérés. En effet en équipant seulement 10% des STEP il est possible de diminuer la charge de près de 50%. Comme c'était à prévoir, cette stratégie n'évite pas des situations défavorables sur le plan écotoxicologique sur certains tronçons de cours d'eau. Par la méthode des bilans de flux lacustres on peut estimer le recul de la charge de micropolluants contenue dans le lac suite à l'application de ces mesures : il est illustré par l'exemple du benzotriazole en figure 5.

état actuel



scénario 1a



scénario 1b

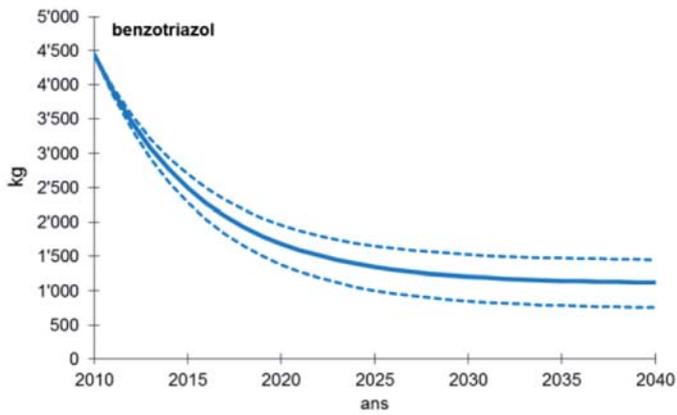


Figure 5 : Evolution de la charge contenue dans le lac suite à l'implémentation des mesures des scénarios 1a et 1b (droite) à l'exemple du benzotriazole et comparaison à la situation actuelle (gauche) ; les lignes en traitillés représentent un écart de 30% sur les flux entrant dans le Léman.

Figure 5 : Trends of loads in the lake after implementing measurements of scenarios 1a and 1b (right) with the example of benzotriazole and compared to the current situation (left); dashed lines represent a deviation of 30% of the flow into Lake Geneva.

SCÉNARIO 2 : PROTECTION DE L'ÉCOSYSTÈME

Ce scénario a pour but d'éviter les concentrations problématiques dans les milieux récepteurs.

Mesures : Équipement des stations d'épuration dont les rejets provoquent des concentrations en micropolluants supérieures aux critères de qualité.

Tableau 7 : Résumé des résultats du scénario 2.

Table 7 : Summary of results for scenario 2.

Milieu récepteur	Etat actuel	scénario 2 (critères écotoxicologiques: -> éviter tout dépassement)
<i>Équipement des STEP</i>		
Nombre de STEP équipées d'une étape de traitement supplémentaire	-	86 (sur 218)
<i>Réduction de la charge de substances</i>		
Réduction sur l'intégralité des bassins versants étudiés	-	25%
Réductions des charges rejetées dans le lac Léman	-	30%
<i>Evolution du respect des critères de qualité aux points étudiés des cours d'eau récepteurs (lac non compris)</i>		
Débit non connu	12%	12%
Les critères de qualité sont remplis pour toutes les substances étudiées	37%	84%
Les critères de qualités sont dépassés pour une substance au moins	51%	4%

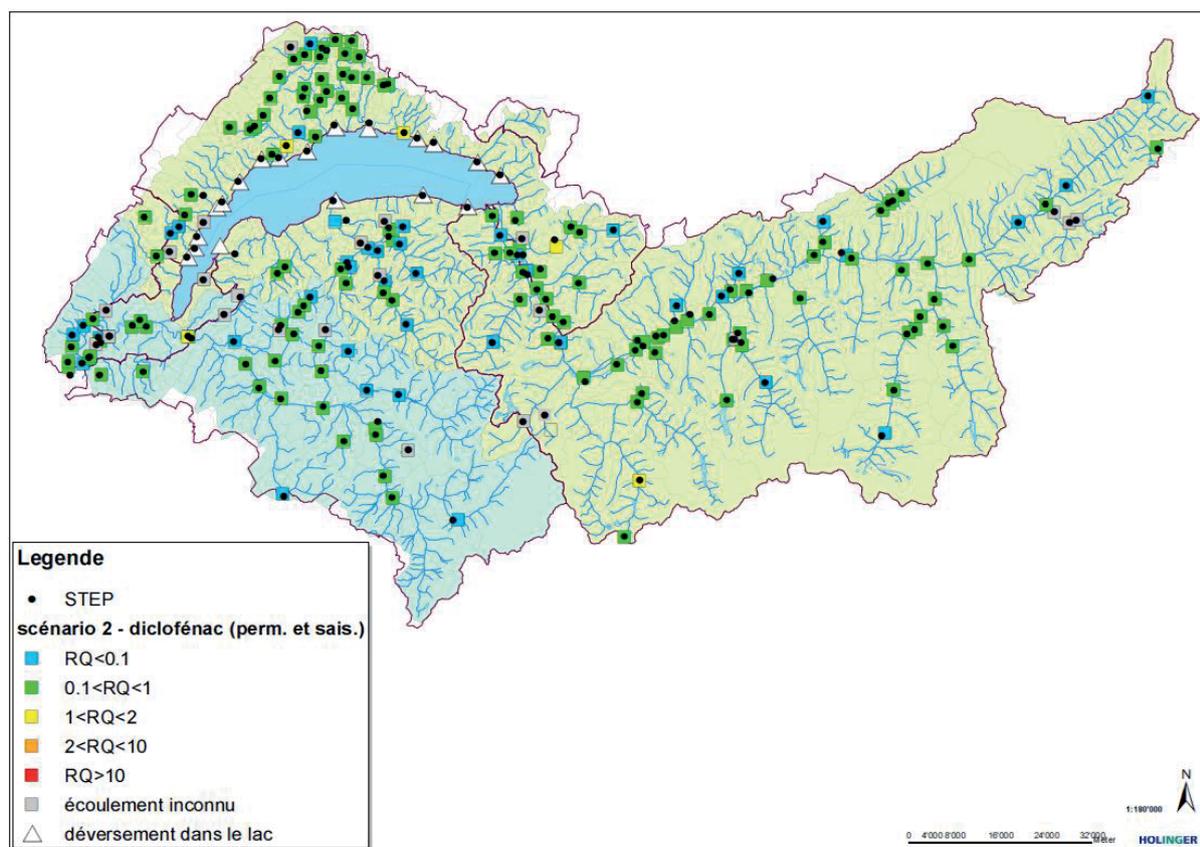
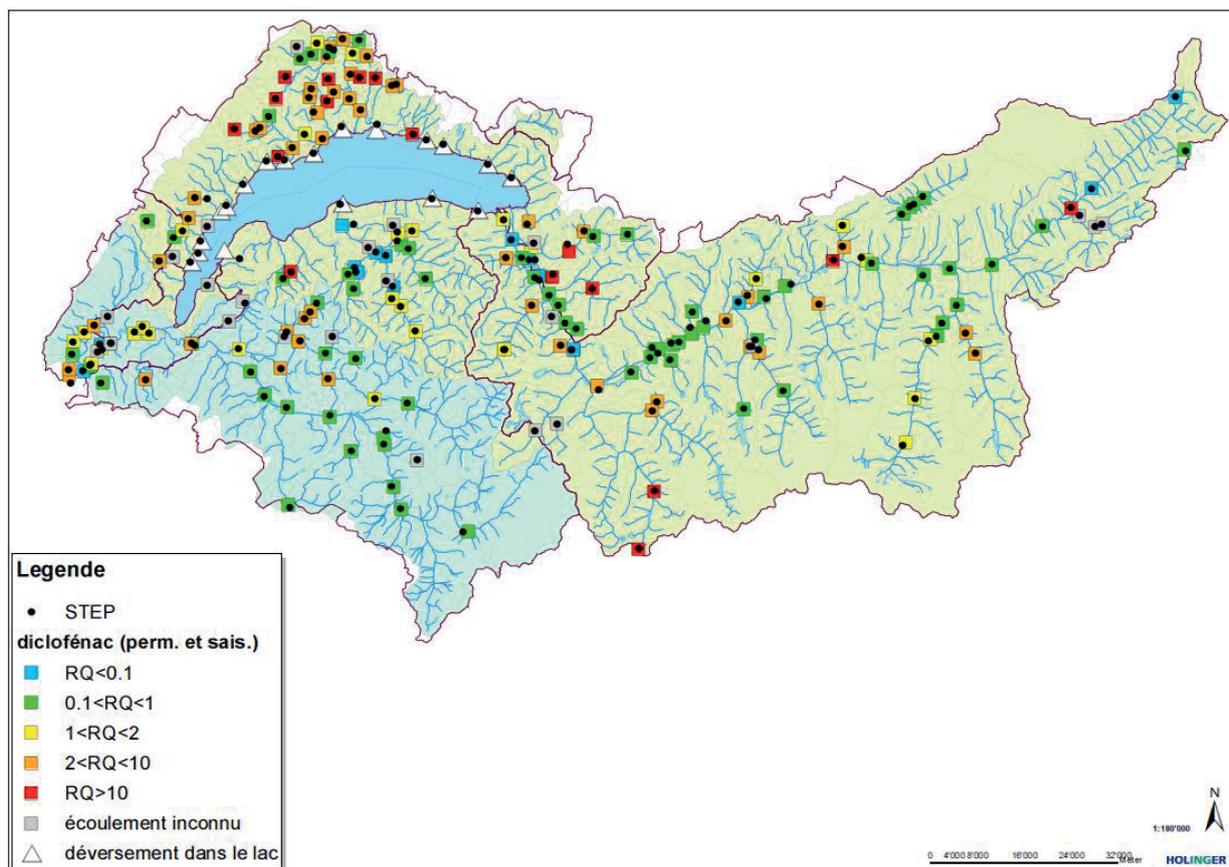


Figure 6 : Quotients de risque (RQ) pour le diclofénac. Haut: état actuel; bas: scénario 2.

Figure 6 : Risk quotients (RQ) for diclofenac. Top: current status; bottom: Scenario 2.

Le scénario 2 conduit à une amélioration considérable de la qualité des cours d'eau, puisque seuls 4% des points présentent encore des dépassements. Toutefois il ne permet de diminuer que d'un quart la charge des substances déversées dans les bassins étudiés. De plus, il nécessite l'équipement de près de 40% des stations d'épuration (86 sur 218 STEP).

La figure 7 montre l'effet des mesures sur l'évolution de la charge contenue dans le lac, à l'exemple du benzotriazole, par rapport aux prévisions découlant de l'état actuel : le recul est modeste.

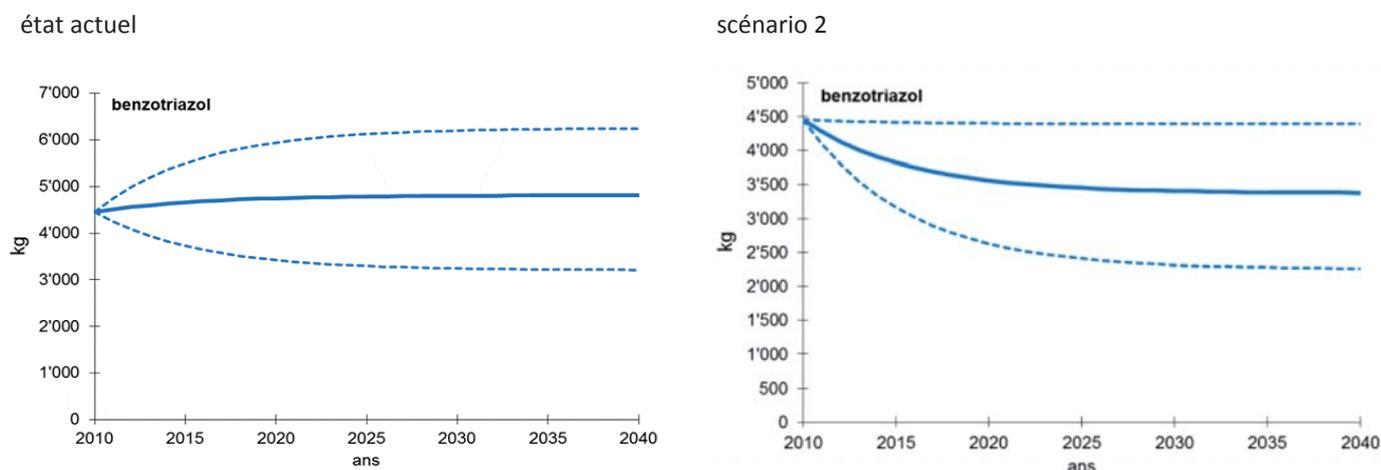


Figure 7 : Effet des mesures de scénario 2 sur l'évolution des charges contenues dans le Léman, à l'exemple du benzotriazole : état actuel, (à gauche), conséquence des mesures de réduction (à droite).

Figure 7 : Effect of Scenario 2 measurements on the trends of charges in Lake Geneva, with the example of benzotriazole: current state, (left), consequence of the reduction (right).

SCÉNARIO 3: STRATÉGIE ÉTUDIÉE DANS LE CADRE DE LA RÉVISION DE LA LEAUX

Ce scénario équivaut aux critères proposés par la Confédération dans le cadre de la révision de la Loi sur la protection des eaux (LEaux), au moment de l'étude (critères 1 à 3 du Message concernant la modification de la loi fédérale sur la protection des eaux). Il prévoit l'équipement des installations suivantes :

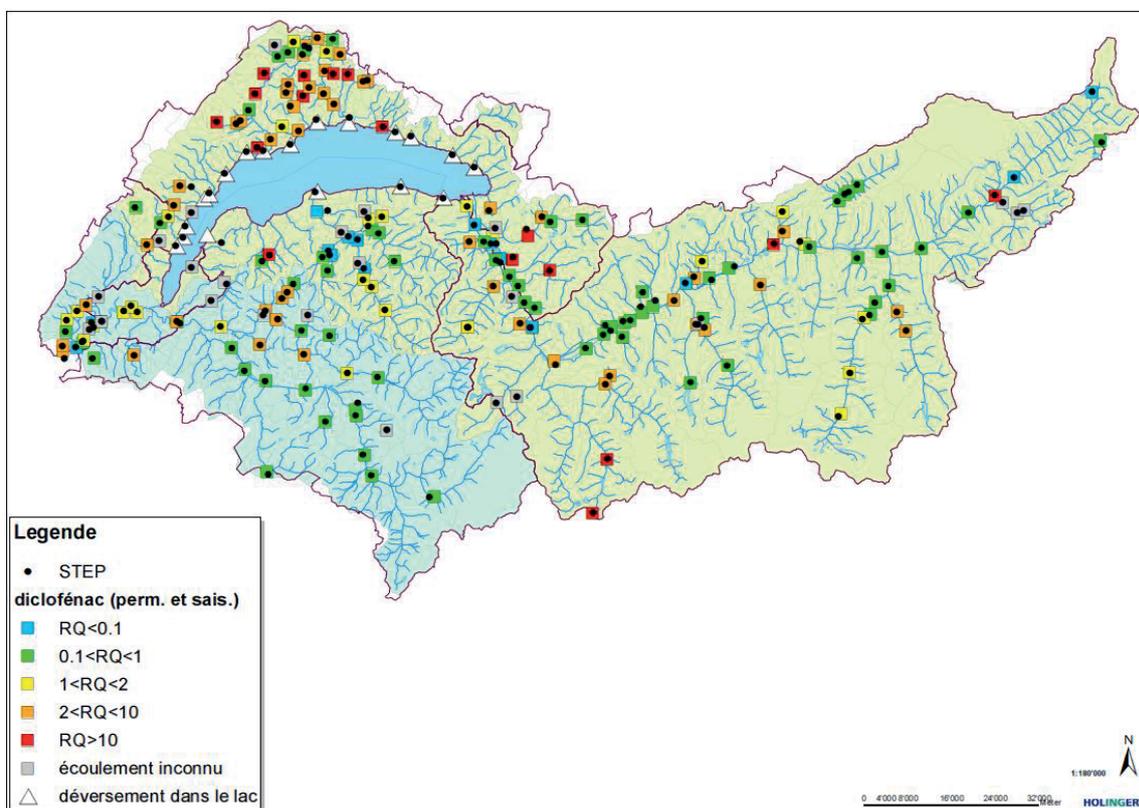
- plus de 80'000 habitants raccordés ;
- plus de 8'000 habitants raccordés et dont les effluents représentent plus de 10% dans le milieu récepteur ;
- plus de 24'000 habitants raccordés et dont les effluents sont déversés dans le bassin versant d'un lac.

Notons que les mesures du scénario 3 n'ont été appliquées que sur le territoire suisse. Pour la France, les valeurs en l'état actuel ont été reprises.

Tableau 8 : Résumé des résultats du scénario 3. Scénario de calculs appliqué à la Suisse (152 STEP), en France état inchangé.

Table 8 : Summary of results of scenario 3. Scenario calculations applied to Switzerland (WWTP 152), unchanged state in France.

Milieu récepteur	Etat actuel	scénario 3 (critères de l'OFEV, appliqué à la Suisse seulement)
<i>Equipement des STEP (en Suisse seulement)</i>		
Nombre de STEP équipées d'une étape de traitement supplémentaire	-	29 (sur 152)
<i>Réduction de la charge de substances (en Suisse et sur tout le territoire étudié)</i>		
Réduction sur l'intégralité des bassins versants étudiés	-	49% (dont en CH 66%)
Réductions des charges rejetées dans le lac Léman	-	53% (dont en CH 62%)
<i>Evolution du respect des critères de qualité aux points étudiés des cours d'eau récepteurs (en Suisse, seulement, lac non compris)</i>		
Débit non connu	12%	12%
Les critères de qualité sont remplis pour toutes les substances étudiées	35%	49%
Les critères de qualités sont dépassés pour une substance au moins	54%	39%



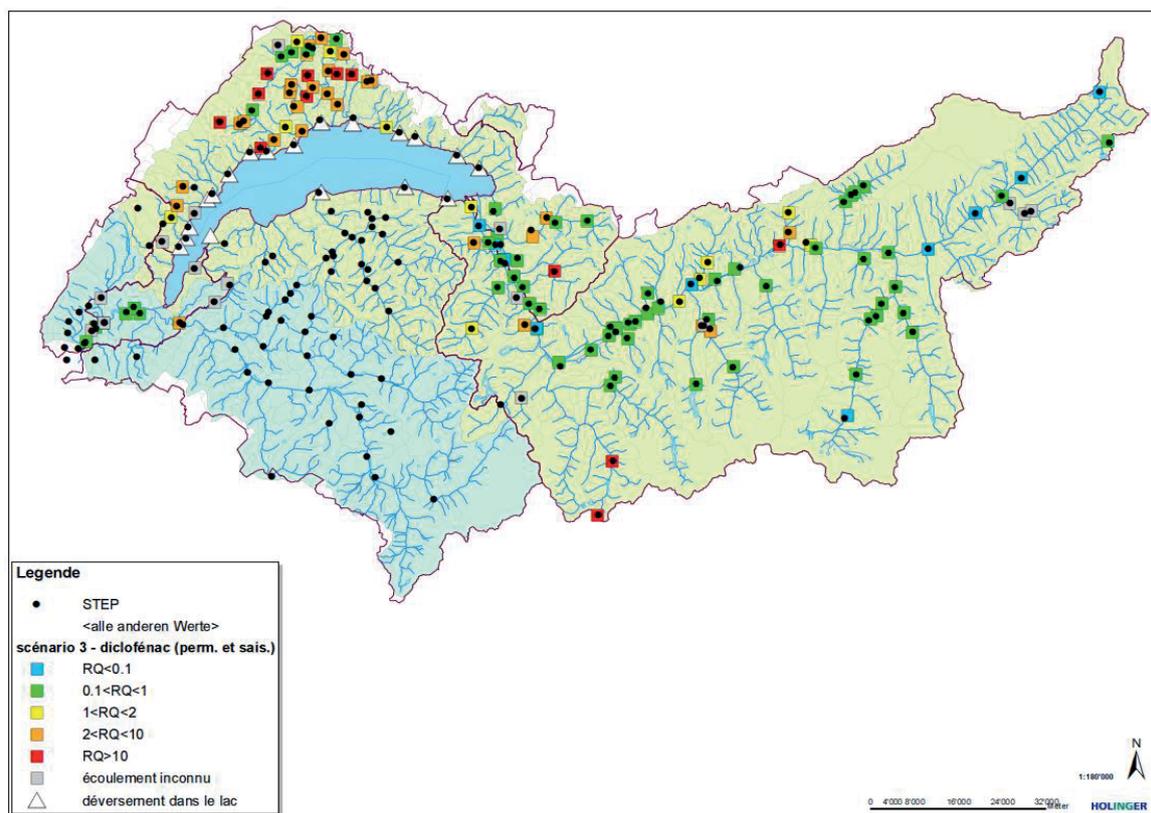


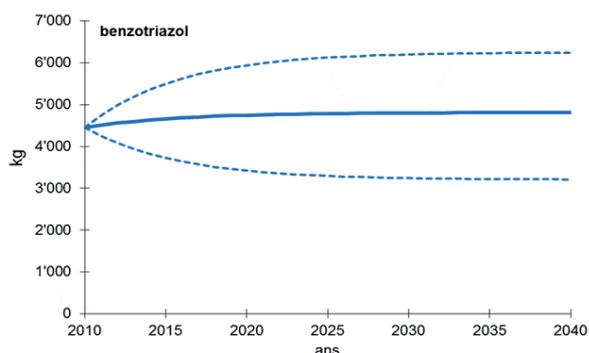
Figure 8 : Quotient de risque (RQ) pour le diclofenac. Haut : état actuel ; bas : scénario 3, calculé pour la Suisse seulement.

Figure 8 : Risk Quotient (RQ) for diclofenac. Top: current status; Bottom: scenario 3, calculated for Switzerland only.

Le scénario 3 permet de diminuer de 53% la charge totale sur l'ensemble du territoire, via l'équipement de 29 STEP suisses. Le scénario 3 permet également d'améliorer la qualité écotoxicologique des milieux récepteurs en aval proche des points de rejets. Les dépassements sont particulièrement nombreux dans le canton de Vaud où l'on compte de nombreuses STEP de petite taille se déversant dans des rivières de faible débit, ou du moins inférieures à 8000 habitants donc non incluses dans les critères appliqués. En Valais, les dépassements sont moins nombreux ; ils semblent toucher soit des stations touristiques, soit des villes déversant dans des milieux récepteurs de faible débit. Pour tenir compte de ces cas, la Confédération a élargi les critères de la révision de LEaux à des cas exceptionnels de petites STEP allant jusqu'à 1000 habitants raccordés (v. critère 4 du Message concernant la modification de la Loi fédérale sur la protection des eaux). Parmi les mesures applicables, on peut envisager, outre l'élimination par traitement quaternaire, le regroupement de petites STEP ou la dérivation vers une STEP en aval.

A l'échelle du lac, d'après le modèle simple retenu, cette diminution des déversements se répercuterait sur l'évolution de la charge contenue dans le lac, comme illustré en figure 9 à l'exemple du benzotriazole. Par rapport aux prévisions découlant de l'état actuel, la charge diminuerait de moitié environ.

état actuel



scénario 3

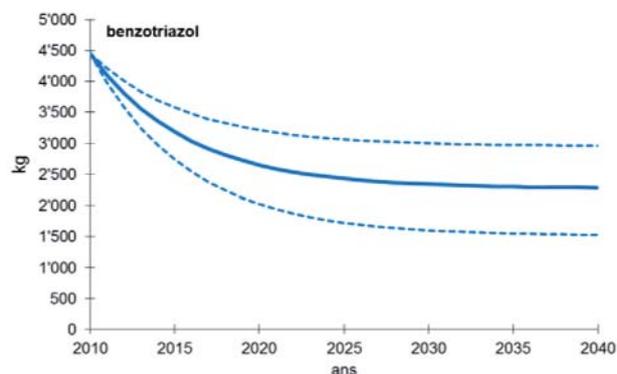


Figure 9 : Effet des mesures de scénario 3 sur l'évolution des charges dans le Léman, à l'exemple du benzotriazole : état actuel, (à gauche), conséquence des mesures de réduction (à droite).

Figure 9 : Effect of Scenario 2 measurements on the trends of charges in Lake Geneva, with the example of benzotriazole: current state, (left), consequence of the reduction (right).

5.5 ESTIMATION DU COÛT DES MESURES

L'estimation des coûts d'une étape de traitement pour l'élimination des micropolluants repose sur les informations recueillies dans le rapport de l'OFEV sur les coûts de l'élimination des micropolluants dans les eaux usées en Suisse (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

Les coûts d'investissement et les frais d'opération par équivalent-habitant dépendent du dimensionnement de la STEP. Seuls ont été considérés les procédés au charbon actif en poudre (CAP) et l'ozonation. Pour la Suisse comme pour la France, les mêmes bases d'estimation ont été employées ; toutes les valeurs sont indiquées en CHF.

Les coûts liés à un éventuel équipement pour la nitrification ne sont pas considérés dans cette étude.

Les estimations de coûts pour les scénarios 1 à 3 sont résumées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Résumé des estimations de coûts pour les différents scénarios d'équipement de STEP étudiés. Les fourchettes indiquées représentent la différence entre ozonation et charbon actif (investissements et frais).

Table 9 : Summary of cost estimates for the different scenarios of WWTP equipment studied. The ranges shown represent the difference between ozonation and activated carbon (investments and expenses).

	Nombre de STEP à équiper		Dimensionnement total en millions d'EH		Investissement en millions CHF		Frais annuels (investissement + exploitation en millions CHF/a)		Rapport coût / efficacité (CHF / % éliminé / habitant raccordé)	
	CH	F	CH	F	CH	F	CH	F	CH	F
Scénario 1a	13	7	1.74	0.51	140 - 202	63 - 89	15 - 34	6 - 13	16 - 35	19 - 42
Scénario 1b	50	21	3.15	0.87	343 - 481	137 - 190	32 - 69	12 - 24	24 - 50	25 - 50
Scénario 2	61	26	0.58	0.32	178 - 231	87 - 113	13 - 22	6 - 11	35 - 59	29 - 53
Scénario 3 (Suisse seulement)	29	-	2.0	-	218 - 307	-	21 - 44	-	19 - 39	-

6. CONCLUSIONS

Le modèle de calcul des flux de micropolluants a permis de calculer les charges déversées par 218 STEP pour 13 substances indicatrices.

Les concentrations dans les milieux en période d'étiage, ont été calculées pour 212 points situés en aval des exutoires des STEP. Celles-ci ont été comparées à des critères de qualité écotoxicologique et ont montré que 70 points de rejets présentent des concentrations dans le milieu risquant de nuire à l'écosystème.

Un bilan des flux réalisé au niveau du lac pour 4 substances a permis d'estimer et de prédire l'évolution des stocks retenus dans le Léman, sur une période de calcul de 30 ans, sur la base d'hypothèses simples de modélisation. Le modèle a montré que pour 3 substances (le benzotriazole, la gabapentine et la metformine), les concentrations actuelles sont proches de la situation d'équilibre. En revanche, le bilan du lac prédit une diminution de la masse contenue dans le Léman pour la carbamazépine en raison des flux passés apportés par le Rhône, liés à des déversements industriels.

Trois scénarios d'équipement des STEP ont été testés dans le but de comparer l'effet de différentes stratégies sur la réduction des charges en micropolluants et l'amélioration de la qualité des cours d'eau. Ces scénarios simulent l'implémentation d'un traitement quaternaire pour l'élimination des micropolluants au niveau des STEP (traitement par charbon actif en poudre ou ozonation).

Les résultats de cette étude pointent sur les points sensibles du réseau hydrographique vis-à-vis de la problématique des micropolluants issus des STEP. Particulièrement touchés sont, d'une part, les cours d'eau des régions alpines latérales qui connaissent, simultanément à la période d'étiage, une démultiplication de la population raccordée dû au tourisme (Haute-Savoie et Valais) et, d'autre part, des régions comptant de nombreuses petites STEP déversant dans des cours d'eau de faible débit (Ain et Vaud). Le Léman présente un cas particulier du fait du volume d'eau important qui le rend capable de retenir des stocks considérables de micropolluants pendant de longues décennies. Du fait des connaissances incomplètes (profondeur de stratification, brassage complet irrégulier), il est toutefois difficile de faire des pronostics précis sur la durée de rétention des micropolluants dans le Léman.

L'étude des scénarios a présenté des solutions de réduction permettant d'éliminer une charge de micropolluants maximale ou d'améliorer les points les plus sensibles du réseau hydrographique. Pour les autres cas, notamment celui de petites STEP déversant dans des cours d'eau de faible débit, non comprises dans les critères appliqués (canton de Vaud, par exemple), des solutions régionales devront être élaborées au cas par cas, alimentées au besoin de données spécifiques précises.

Les résultats montrent que la solution est complexe et ne peut être résolue de manière globale en équipant un certain nombre de STEP. Ils permettent en revanche d'illustrer les cas particulièrement problématiques et pourront servir d'aide à la décision en Suisse comme en France pour des actions de lutte et de réduction des micropolluants dans les eaux.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNARD, M., ARNOLD, C. et MANGE, P. (2014) : Micropolluants dans les eaux du Rhône. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2013, 132-149.
- BG Ingenieure und Berater AG. (2012) : Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser. Bern : Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- CONDAMINES, M. (2014) : Contrôle des stations d'épuration (STEP). Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2013, 201-221.
- DCE DIRECTIVE 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau - Journal officiel des Communautés européennes du 24.12.2008.
- GÄLLI, R., ORT, C. et SCHÄRER, M. (2009) : Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Publikation Umwelt-Wissen. Bern : Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- GÖTZ, C. KASE, R., HOLLENDER, J. (2011) : Micropolluants - Système d'évaluation de la qualité des eaux au vu des composés traces organiques de l'assainissement communal. Eawag, Dübendorf : OFEV.
- GÖTZ, C. et al. (2012) : Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Stoffflussmodellierung, Situationsanalyse und Reduktionspotenziale für Nordrhein-Westfalen. s.l. : Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MKULNV), D.
- GÖTZ, C., METTLER S., VERMEIRSEN E. (2013) : Modélisation du flux de micropolluants provenant des rejets de l'épuration des eaux usées, Rapport ENVILAB, 76 p.
- (IKSR) Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2010) : Strategie Mikroverunreinigungen - Strategie für die Siedlungs- und Industrieabwässer. Koblenz, xx p.
- LEaux (1991) : Loi du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (état au 1er janv. 2014) (Suisse).
- MARGOT J., KIENLE C., MAGNET A., WEIL M., ROSSI L., DE ALENCASTRO L.F., ABEGGLEN C., THONNEY D., CHÈVRE N., SCHÄRER M., BARRY D.A. (2013) : Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? Science of the Total Environment. Vol. 461-462: 480-498.
- MORASCH B., BONVIN F., REISER H., GRANDJEAN D., DE ALENCASTRO F., PERAZZOLO C., CHÈVRE N. (2010) : Occurrence and fate of micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, CH. Part II: Micropollutant removal between wastewater and raw drinking water. Environmental Toxicology and Chemistry. 29(8) : 1658-1668.
- OEAux (1998) : Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (état au 1^{er} janvier 2014) (Suisse).
- RAMSEIER GENTILE, S., EDDER, P., ORTELLI, D. et KLEIN, A. (2014) : Métaux et micropolluants organiques dans les eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2013, 67-80.
- RUHRVERBAND (2009). Ruhrgütebericht. s.l. : Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke an der Ruhr und Ruhrverband, 2009.
- SCHWARZENBACH, R., GSCHWEND, P., et IMBODEN, D. (1993) : Environmental organic Chemistry. New York : Wiley & Sons.