

# Qualité des eaux

# L'eau des lacs : peut-on la boire et s'y baigner ?

► Dominique Reignier, ARS 74 • Françoise Kerrien, ARS Rhône-Alpes, DD de la Savoie •

**Les exigences de qualité auxquelles doit répondre une eau superficielle diffèrent selon les usages. La production d'eau potable, les activités de baignade, de sports nautiques et de pêche supposent une surveillance poussée.**

## Une eau utilisée pour l'alimentation en eau potable et la baignade

**Les prélèvements** issus des lacs alpins **pour la distribution en eau potable** sont très importants. Sur le Léman, la production annuelle est proche de 80 millions de m<sup>3</sup>/an, issue de 10 stations de pompage, pour environ 870 000 habitants desservis. Le lac d'Annecy est également fortement sollicité. La seule station de pompage de la Puya prélève près de 15 millions de m<sup>3</sup>/an (soit environ 1 % du volume du lac) pour alimenter la Communauté d'Agglomération d'Annecy. Dans le lac du Bourget, on prélève à Mémard de l'ordre de 2 millions de m<sup>3</sup>/an et dix fois moins à Tresserve. Le lac d'Aiguebelette fournit quant à lui 0,7 million de m<sup>3</sup>/an.

**L'activité baignade est largement développée en période estivale** (photo 1). Plusieurs dizaines de milliers de personnes sont présentes les jours d'affluence sur les sites. Un suivi de la qualité des eaux est effectué sur 115 sites pour le Léman, 14 pour le lac d'Annecy, 10 pour le lac du Bourget et 8 pour le lac d'Aiguebelette.

## Une eau qui doit répondre à certaines exigences de qualité

Les normes de qualité sont fixées en France par le Code de la Santé Publique sur la base de directives européennes. En Suisse, elles se basent sur les recommandations de l'Office Fédéral de la Santé Publique, de l'Office Fédéral de l'Environnement et des associations des chimistes et médecins cantonaux.

Les normes portent sur des paramètres microbiologiques, biologiques (algues), physico-chimiques (dont les micropolluants) et radiologiques\* pour les eaux destinées à la consommation. Elles se partagent entre limites de qualité (concentrations à ne pas dépasser) et références de qualité.

Les eaux de lac destinées à la consommation humaine ne peuvent pas être distribuées sans traitement préalable, car il subsiste des contaminations bactériennes, des matières en suspension minérales et organiques qu'il convient d'éliminer pour atteindre une qualité d'eau potable. Les eaux destinées à cet usage sont classées en 3 catégories de qualité décroissante, A1, A2 et A3. Les grands lacs alpins s'inscrivent tous dans la catégorie A1.

Photo 1 – Plage sur le lac du Bourget (© CISA LB) ◀



## Une eau qui fait l'objet d'une surveillance attentive

**Les eaux de baignade** font l'objet d'analyses bactériologiques réalisées tous les 15 jours en saison estivale. En cas de présence importante de germes d'origine fécale *Escherichia Coli* et *enterocoques*, la baignade est interdite jusqu'à disparition de la contamination et absence de danger pour la santé des baigneurs.

En 2013, les eaux de baignade des lacs d'Annecy (photo 2), du Bourget et d'Aiguebelette ont toutes été classées en bonne ou excellente qualité. Pour le Léman, 85 % des plages ont une eau de bonne ou d'excellente qualité, 12 % une qualité moyenne et deux plages ont été momentanément polluées. En 2014, plus aucune plage n'est interdite à la baignade.



Photo 2 – Détente aux alentours de Talloires (© GRAIE)

**Les eaux potables** sont contrôlées sur un grand nombre de paramètres, du pompage jusqu'au robinet du consommateur, avec des fréquences hebdomadaires à trimestrielles selon l'importance du débit prélevé.

Pour atteindre une qualité d'eau potable, les eaux brutes des lacs font l'objet soit d'un traitement classique par filtration sur sable et d'une désinfection (traitement suffisant pour rendre conforme l'eau des lacs à un usage d'eau potable), soit d'un traitement par ultrafiltration comme à Annecy et Yvoire avec plusieurs stations de pompage équipées (photo 3).

Pesticides, microcystines (toxines produites par certaines algues) ou résidus médicamenteux sont parfois détectés dans les lacs. Ces polluants sont généralement présents en très faible quantité mais par mesure de précaution, des traitements complémentaires du type ozonation-adsorption sur charbon actif ont été installés, notamment pour les eaux du Léman (à Vevey, Genève, Évian-les-Bains, Yvoire et Nyon) et du lac du Bourget.



Photo 3 – Station d'ultrafiltration des Espagnoux, sur les bords du lac d'Annecy (© ARS DD74)

## Ce qu'il faut retenir

**Les grands lacs alpins sont des réservoirs d'eau douce qui alimentent une population de plus en plus nombreuse et accueillent des dizaines de milliers de baigneurs sur les plages en été. Leurs eaux, très surveillées, sont globalement de bonne qualité et parfaitement compatibles avec ces usages. Il convient toutefois de rester vigilant sur la présence de certains micropolluants, qui peuvent nécessiter la mise en place de traitements de potabilisation adaptés à la toxicité de ces molécules.**

**Paramètres radiologiques des eaux** *Ils permettent d'évaluer la radioactivité naturelle qui dépend de la nature géologique des terrains, du temps de contact, de la température et de la solubilité des radioéléments rencontrés.*

# Qu'est-ce qu'un lac en bon état ?

► Lionel Navarro et Stéphane Stroffek, Agence de l'Eau RMC • Jean-Claude Raymond, ONEMA •

**Les grands lacs alpins constituent des milieux intéressants sur le plan patrimonial et écologique. La pérennité de ce patrimoine et des ressources qu'ils offrent suppose de maintenir ces écosystèmes en bon état.**

## Qu'est-ce que le bon état d'un lac ?

### C'est un lac qui garantit des services socio-économiques

La bonne qualité de l'eau d'un lac garantit un bon exercice des usages avec, par exemple, des coûts de traitement limités s'il s'agit d'alimenter les populations humaines ou des filières industrielles exigeantes. La présence de pesticides dans l'eau brute destinée à produire de l'eau potable entraîne, par exemple, un coût supplémentaire de traitement de 0,20 € par m<sup>3</sup> (soit un surcoût de 24 € par an pour une facture moyenne de 120 m<sup>3</sup>). Un lac exempt de contamination chimique garantit la qualité des poissons destinés à la consommation humaine, et assure des conditions sanitaires suffisantes pour les activités nautiques.

La préservation de la capacité d'inondation de zones périphériques des lacs assure un service naturel d'écrêtage de crues, qui protège des inondations les territoires plus à l'aval. Ainsi, les marais de Lavours et de Chautagne qui jouxtent le lac du Bourget permettent de réduire les risques d'inondations à l'aval, sur l'agglomération lyonnaise. La plaine de Chautagne et le lac du Bourget écrètent jusqu'à 500 m<sup>3</sup>/s (sur un débit de 3000 m<sup>3</sup>/s) du Rhône supérieur. La préservation des lacs bénéficie au territoire lui-même : la protection ou le retour à des berges naturelles permet le développement d'une végétation favorable à la faune. Cette diversité d'habitats structure les paysages qui sont un marqueur fort du cadre de vie des habitants des territoires lacustres. Le tourisme peut alors se développer.

### C'est un lac qui a un bon état écologique et chimique

La notion de bon état est définie par la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE), la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA), et plusieurs arrêtés et circulaires. On détermine l'état d'un lac à partir de l'évaluation de son état écologique et de son état chimique (fig. 1).

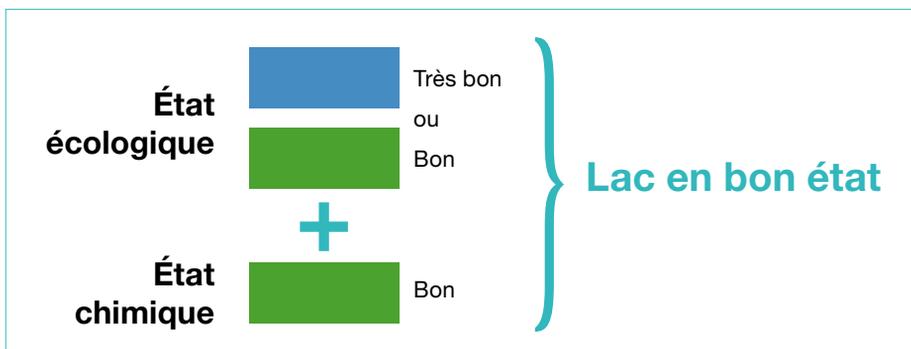


Fig. 1 – Démarche d'évaluation du bon état d'un lac (source fig. 1 et 2 : AE RMC – L. Navarro)

L'état écologique est établi à partir de paramètres caractérisant la biologie (algues planctoniques) et la physico-chimie (azote, phosphore, métaux, transparence). Il est défini comme la plus mauvaise des 5 classes (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais) observées par ces différents paramètres.

L'état chimique est établi sur la base du dépassement ou non des Normes de Qualité Environnementales (NQE) de 53 substances dangereuses recherchées dans l'eau du lac. Il est défini selon deux modalités : bon ou mauvais.

Les données utilisées pour qualifier l'état d'un lac sont issues des réseaux de surveillance mis en place par l'Agence de l'Eau et l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques. Ces réseaux complètent les suivis engagés localement par les gestionnaires, permettant ainsi d'observer et d'intégrer à l'évaluation l'ensemble des composantes de l'écosystème lacustre.

## Quel est l'état des grands lacs alpins ?

Les grands lacs alpins sont globalement en bon état (fig. 2) pour la qualité de leur eau grâce aux actions conduites essentiellement dans le domaine de l'assainissement. Cet effort doit être maintenu. Sur le Léman, les lacs d'Aiguebelette et du Bourget, l'état écologique apparaît moyen à médiocre pour certains paramètres : ceci se



Photo 1 – Le lac du Bourget (© M. Bouron)

	État écologique*	État chimique*	Paramètres déclassants
<b>Annecy</b>			–
<b>Léman</b>			Algues planctoniques/ nutriments
<b>Bourget</b>			Algues planctoniques/ nutriments, poissons
<b>Aiguebelette</b>			Poissons, végétation aquatique

Fig. 2 – État écologique et chimique des 4 grands lacs alpins (basé sur des données des réseaux de surveillance de 2009 pour le lac d'Aiguebelette et 2010 pour les 3 autres lacs) (source : AERMC – L. Navarro)

\* Très bon état : bleu, bon état : vert, état moyen : jaune, état médiocre : orange, mauvais état : rouge

traduit par une dégradation des habitats aquatiques, des impacts encore marqués par des apports de nutriments issus des activités humaines historiques et actuelles sur leur bassin versant.

La connaissance des effets des micropolluants sur le fonctionnement des écosystèmes doit être précisée. Des actions doivent également être menées pour protéger ou restaurer la qualité des habitats aquatiques. L'accès à ces habitats doit être assuré lorsqu'ils sont situés sur les affluents des lacs et qu'ils constituent des zones de reproduction pour certaines espèces piscicoles, en particulier la truite lacustre. Cette nécessité a notamment été identifiée pour le lac d'Annecy qui a plusieurs seuils infranchissables pour les poissons sur certains de ses affluents.

### Ce qu'il faut retenir

**L'atteinte du bon état des lacs est une condition nécessaire à la préservation durable et efficace des services socio-économiques offerts par les lacs et du patrimoine naturel qu'ils représentent.**

**L'état des grands lacs alpins a été nettement amélioré ces trente dernières années. Des actions restent nécessaires pour réduire les apports de nutriments, restaurer les habitats des rives et limiter les contaminations chimiques.**

# Comment mesure-t-on la qualité de l'eau ?

► Ghislaine Beaujeu, DREAL Rhône Alpes • Gérard Paolini, CALB •

**Pour évaluer la qualité des lacs, des prospections adaptées sont réalisées pour comprendre leur fonctionnement écologique et leurs caractéristiques physico-chimiques. Ces investigations visent à acquérir des informations sur l'ensemble des composantes de l'écosystème lacustre : pleine eau, sédiments, organismes vivants d'origine végétale (phytoplancton par exemple) ou animale (zooplancton, poissons). Les opérations combinent des mesures directes et des analyses en laboratoire après prélèvements.**

## Un peu d'histoire

À partir des années 1960-1970, les structures locales de gestion ont progressivement mis en place un suivi spécifique sur chacun des lacs afin d'apprécier leur fonctionnement, leur évolution et adapter au mieux des travaux de restauration. Depuis 2007, pour les lacs français, la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) complète ce dispositif par un programme standardisé ciblant tous les lacs de plus de 50 ha. Celui-ci permet d'apporter les éléments nécessaires pour l'évaluation de l'état des plans d'eau (voir question 3-02 : *Qu'est-ce qu'un lac en bon état ?*).

## Les mesures de terrain

Les investigations ont lieu à la verticale du point ayant la plus grande profondeur. Le Léman, compte tenu de sa taille, dispose de 2 points de suivi, l'un sur le petit lac, l'autre sur le grand lac ; les autres lacs possèdent chacun une station de référence au centre du plan d'eau.



Photo 1 – Deux types de disque sont utilisés : soit un disque blanc de 30 cm de diamètre, soit un disque noir et blanc de 20 cm de diamètre (protocole DCE) (© D. Zanella – SILA)

**La transparence de l'eau** donne une information globale sur l'évolution de la densité phytoplanctonique dans le milieu, mais peut aussi révéler la présence de matières en suspension issues des cours d'eau, suite aux événements pluvieux. Elle est estimée par la mesure de la profondeur de disparition visuelle d'un disque de taille normalisée (disque de Secchi – photo 1).

### La stratification des lacs

Les lacs alpins correspondent à des masses d'eau profondes pour lesquelles on observe une stratification thermique estivale et un brassage hivernal qui permet la ré-oxygénation des couches profondes. Lors de chaque campagne, les principales caractéristiques physico-chimiques (température, oxygène dissous, acidité, conductivité, parfois turbidité ou encore fluorescence) sont mesurées selon un axe vertical à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable. Ces profils verticaux permettent d'apprécier, au cours des saisons, l'évolution du niveau de stratification du lac, de suivre l'activité biologique et la disponibilité de l'oxygène.



Photo 2 – Bouteille cylindrique à clapet utilisée pour les prélèvements ponctuels : l'envoi d'une masse (appelée messenger) le long du câble retenant la bouteille provoque sa fermeture et permet d'échantillonner l'eau à la profondeur souhaitée (© CISALB)



### Les prélèvements d'eau brute, de zooplancton et de poissons

**Les échantillons d'eau brute** sont prélevés pour réaliser des analyses physico-chimiques de nutriments, de matières en suspension, de minéralisation et de nombreux micropolluants (plus de 200 substances incluant des pesticides et des métaux). Ils sont également destinés à des analyses hydrobiologiques (chlorophylle a, phéopigments et phytoplancton) afin d'évaluer la production primaire\*.

Les prélèvements d'eau servent aussi à des investigations spécifiques, telles que le suivi de communautés microbiennes et des cyanobactéries dans le lac du Bourget ou l'analyse de résidus médicamenteux sur le Léman.

### Deux types de préleveurs sont mis en œuvre

L'un permet le prélèvement d'un échantillon d'eau ponctuel à l'aide d'une bouteille cylindrique à clapet (photo 2). Les programmes de suivis spécifiques locaux prospectent à différentes profondeurs.

Le second est une bouteille intégratrice en forme de cloche (photo 3) qui permet de reconstituer une portion de la colonne d'eau : c'est un prélèvement dit « intégré ». Il est utilisé pour échantillonner la couche d'eau où se développe la production algale (zone éclairée ou trophogène). Cette zone est comprise pour les lacs alpins entre 0 et 20 m. Dans le cadre de la surveillance des lacs alpins, **des campagnes d'analyses des sédiments** peuvent être effectuées pour identifier différents polluants (notamment les nutriments azote et phosphore ou plusieurs centaines de substances dangereuses) accumulés et potentiellement relargables en pleine eau.

**Des analyses hydrobiologiques** sur la faune macroinvertébrée (oligochètes\* et mollusques) permettent d'apporter des informations sur la capacité des organismes à s'adapter aux conditions régnant au fond du lac et à assimiler la matière organique stockée dans les sédiments.

Photo 3 – Prélèvement intégré : la cloche se remplit progressivement lors de la descente le long de la colonne d'eau. Au cours de la remontée, sous l'effet de la pression, une valve ferme la bouteille (© DREAL Rhône-Alpes)

	SUPPORT	PARAMÈTRES	TYPE D'OPÉRATION
<b>Physico-chimie</b>	Eau	Oxygène dissous, pH, conductivité, température, transparence	Mesures in situ : profils verticaux (sonde multi-paramètres), disque de Secchi
		Physico-chimie classique : demande biochimique en oxygène (DBO5), matières en suspension, carbone organique, matières azotées et phosphorées, turbidité, silice dissoute	Prélèvements intégrés et ponctuels
		Minéralisation : calcium, sodium, magnésium, potassium, dureté, sulfates, chlorures, bicarbonates, titre alcalimétrique	
		Micropolluants : substances prioritaires, pesticides...	
		Autres analyses : résidus médicamenteux par ex.	Prélèvements ponctuels
	Sédiment	Macropolluants : carbone organique, phosphore, azote, teneur en matière organique	Prélèvements par benne
		Micropolluants : substances prioritaires, pesticides	
Chair des poissons	Micropolluants (mercure, PCB, pesticides, perfluorés, phtalates...)	Pêche	
<b>Hydrobiologie</b>	Eau	Chlorophylle	Prélèvements intégrés
		Phytoplancton	
		Autres suivis : communautés microbiennes et de cyanobactéries par ex.	Prélèvements ponctuels
		Zooplancton : microcrustacés	Prélèvements au filet
	Sédiment	Macroinvertébrés : oligochètes* et mollusques	Prélèvements par benne
	Poisson	Suivi piscicole	Pêche au filet, hydroacoustique
	Macrophytes	Description des herbiers	Relevés
<b>Hydromorphologie</b>	Berges et littoral lacustre	Niveau d'altération des berges, qualité des habitats littoraux, bathymétrie	Relevés

Fig. 1 – Récapitulatif des investigations réalisées sur les plans d'eau dans le cadre des suivis locaux et de la DCE (source : G. Beaujeu et G. Paolini)

**Des prélèvements de zooplancton** (photo 4) sont réalisés dans le cadre des suivis locaux spécifiques des lacs du Bourget, d'Annecy et du Léman. L'étude du zooplancton porte sur les micro-crustacés et contribue à faire le lien avec d'autres observations (notamment phytoplancton et transparence).

#### L'étude du peuplement piscicole

Le poisson fait l'objet d'un suivi couplant 3 méthodes : pêches scientifiques aux filets, comptage hydroacoustique et données halieutiques (voir question 4-04 : *Comment est gérée la ressource piscicole des lacs ?*). Des mesures sont également réalisées sur la chair des poissons afin de rechercher certains micropolluants (mercure, phtalates, pesticides, PCB...).

**Des relevés liés aux macrophytes et aux conditions hydromorphologiques** peuvent être effectués en période de développement de la végétation de juillet à septembre.

- Les relevés de macrophytes (végétaux aquatiques visibles à l'oeil nu) permettent d'évaluer le niveau trophique du lac. Ils consistent à recenser la végétation sur différents types de rives. Les herbiers sont décrits afin de caractériser la végétation installée en profondeur se développant à l'interface terre-eau. Différentes techniques d'observation et de prélèvement peuvent être utilisées : plongée sous-marine, bathyscope (boîte à fond vitré), râteau ou grappin.
- La caractérisation de l'hydromorphologie des milieux permet d'apprécier le niveau d'altération des berges, la qualité des habitats littoraux (nature, diversité et répartition spatiale) et la topographie du fond des lacs (bathymétrie). Ces observations physiques apportent une aide à l'interprétation des données biologiques et permettent de mieux appréhender les pressions exercées sur les lacs.



Photo 4 – Filet de vide de maille de 200 µm utilisé pour l'échantillonnage du zooplancton : les prélèvements sont réalisés lors de traits verticaux depuis 50 m de profondeur jusqu'à la surface (© CISALB)

### Ce qu'il faut retenir

**Les plans d'eau subissent de nombreuses pressions modifiant la qualité de l'eau, des sédiments et la morphologie du milieu. Celles-ci impactent la vie des communautés aquatiques.**

**Les mesures réalisées sur les plans d'eau permettent de dresser le diagnostic de l'état général du lac et de surveiller son évolution afin de mieux cibler les actions de restauration et évaluer leur efficacité.**

**Production primaire** *Quantité de matière organique produite à partir de matière minérale ou d'apport en énergie. Les producteurs primaires des lacs sont principalement les algues.*

**Oligochète** *Espèce de ver.*

# Quelle est la pression de l'urbanisation sur la qualité de l'eau des lacs ?

► Jean-Marcel Dorioz et Dominique Trévisan, INRA CARRTEL • Florent Pezet, SAFEGE •

**L'urbanisation, à la périphérie des grands lacs, modifie profondément l'hydrologie des bassins. Elle s'accompagne de l'introduction de nouvelles pollutions et de nouveaux régimes d'exportation des polluants vers le lac, avec un renforcement des risques de pollution diffuse.**

## L'urbanisation perturbe le cycle de l'eau et son traitement

L'urbanisation comprend non seulement le développement des zones d'habitations mais également de zones industrielles et commerciales et du réseau routier. Elle entraîne la chenalisation des rivières et ruisseaux, une imperméabilisation des sols qui diminue le pouvoir tampon hydrologique des bassins versants et une artificialisation des berges (photo 1).

Ce phénomène a deux conséquences :

- l'augmentation du ruissellement des eaux pluviales au détriment de l'infiltration, qui sont transférées au lac plus rapidement;
- la perturbation du fonctionnement des systèmes d'assainissement qui se rejettent dans les lacs (augmentation des débits reçus).

Pour les réseaux d'assainissement unitaires, qui collectent à la fois les eaux usées et les eaux pluviales, les volumes d'eau acheminés jusqu'à la station d'épuration varient selon les conditions pluviométriques. Les stations et les réseaux sont dimensionnés pour gérer une partie des sur-débits liés au temps de pluie. Au-delà d'un certain seuil de précipitations et pour ne pas compromettre le fonctionnement du système d'assainissement, ces sur-débits sont déversés sans traitement dans le milieu aquatique via des déversoirs d'orage.

Des réglementations locales peuvent proscrire tout déversement d'eaux usées non traitées dans un milieu récepteur lorsque celui-ci est particulièrement sensible, comme cela peut être le cas pour les lacs.

Plusieurs solutions existent :

- limiter le ruissellement en favorisant l'infiltration par le choix de revêtements poreux;
- limiter le raccordement des eaux pluviales au réseau de collecte et les acheminer vers des systèmes de gestion « à la source » permettant leur rétention (toitures stockantes, structures réservoirs...) et/ou leur infiltration (noues, fossés, tranchées...);
- généraliser la collecte séparative des eaux (un réseau pour les eaux usées, un autre pour les eaux pluviales);
- en cas de réseau unitaire, créer des bassins de stockage temporaire des eaux pluviales, pour les réinjecter dans la station d'épuration en temps sec afin d'optimiser son fonctionnement.



Photo 1 – Exemple d'urbanisation intensive sur les bords du Léman, région de Morges  
(© J.-M. Zellweger)



Photo 2 – Bassin de prétraitement des eaux pluviales de la RD 1201 avant rejet dans le lac du Bourget (© GRAIE)

### L'urbanisation engendre des pollutions diffuses

Les systèmes urbains (villes proprement dites, zones industrielles et commerciales, réseaux routiers) produisent des quantités importantes de polluants, qui se retrouvent dans les poussières atmosphériques, dans les particules et sur les surfaces imperméables, et sont facilement exportés lors des ruissellements de pluie. Ces eaux contiennent alors des nutriments (azote et phosphore), des hydrocarbures, des métaux (mercure, plomb, zinc, nickel...) des micropolluants organiques (HAP, PCB, pesticides, solvants chlorés...), des résidus de combustion (pétrole, charbon, bois, papier...) de l'usure des infrastructures ou de la circulation automobile. Le salage des réseaux routiers en hiver affecte aussi la composition des eaux (voir question 3-09 : *Quel est l'effet du salage des routes sur les lacs ?*).

À cet inventaire s'ajoutent parfois des microorganismes pathogènes (déjections animales), des herbicides (entretien des espaces verts et des jardins), des polluants émergents (résidus médicamenteux, solvants...). Ces derniers constituent un nouveau défi pour le traitement des eaux et nécessitent de recourir à des technologies avancées dans les stations d'épuration.

Face à ces sources de pollutions diffuses, une série d'actions complémentaires sont à mettre en place pour :

- réduire la pollution à la source (choix des matériaux de couverture et de voirie, maîtrise de la circulation automobile...);
- gérer les eaux pluviales au plus près de là où elles tombent pour limiter leur chargement en polluants par ruissellement et créer des ouvrages permettant leur décantation et/ou leur infiltration (photo 2).

### Le mitage périurbain joue sur la qualité des eaux du milieu rural

L'urbanisation, en favorisant le mitage (morcellement) de l'espace rural situé à sa périphérie, modifie les systèmes agricoles en imposant l'imbrication des parcelles bâties dans le territoire agricole.

Deux tendances sont constatées :

- la surfertilisation des parcelles éloignées des zones urbaines;
- le développement d'un élevage relativement plus intensif.

Ceci aboutit à un accroissement des risques de pollutions diffuses vers les milieux aquatiques, notamment des risques de transfert du phosphore (voir question 3-08 : *Les lacs sont-ils toujours menacés par le phosphore ?*).

### Ce qu'il faut retenir

**Les grands lacs sont des zones de fort développement économique. Il en résulte une croissance urbaine sur le bassin versant, ce qui induit des changements sur la nature, l'intensité et le régime des charges polluantes transférées aux lacs. Les effets, encore mal connus, peuvent être marqués à terme pour la qualité des eaux et des milieux, et nécessitent de nouvelles méthodologies de traitement.**

# Quelle est la pression de l'industrie sur la qualité de l'eau des lacs ?

► Cyrille Girel, CISALB •

**Sur les bassins versants des lacs alpins, l'industrie est représentée par de grosses entreprises et des milliers de moyennes à très petites entreprises, aux productions variées. Cette diversité, réel atout pour l'économie, crée une pression sur la qualité de l'eau par des rejets accidentels ou continus de composés chimiques, souvent toxiques, dans les réseaux d'assainissement ou directement au milieu aquatique.**

## Des grandes entreprises aux PME-PMI

Depuis 10 ans, les grosses entreprises, historiquement implantées dans des zones industrielles, ont réalisé des efforts de réduction de leur empreinte environnementale, encouragées par les collectivités locales qui ont renforcé leur politique de suivi et de réduction des rejets non domestiques. Actuellement, ce sont surtout les PME-PMI, souvent imbriquées dans le tissu urbain, le transport de matières dangereuses, ainsi que les sites industriels pollués hérités du passé, qui sont une source de pollution diffuse difficile à maîtriser.

## Les micropolluants : une pollution invisible

Les micropolluants, avec des concentrations qui se mesurent dans le milieu naturel en micro-grammes ou nanogrammes par litre d'eau, sont potentiellement dangereux à des concentrations mille à un million de fois plus faibles que les polluants classiques (voir question 3-07 : *Que deviennent les micropolluants introduits dans les lacs ? Quels sont les risques associés ?*). Compte tenu de la durée de renouvellement des eaux d'un lac (une dizaine d'années pour le lac du Bourget et le Léman – voir question 1-03 : *Combien de temps faut-il pour renouveler les eaux d'un lac ?*), le danger qui pèse sur les lacs et leurs usages est grand.

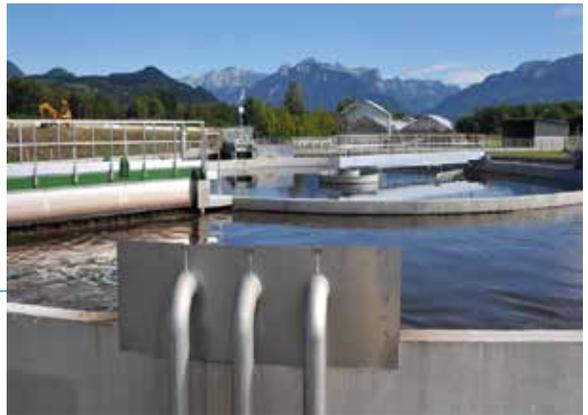


Photo 1 – La station d'épuration de Bellecombe (Haute-Savoie) fait l'objet d'un programme d'étude ambitieux sur les micropolluants et résidus de médicaments (© GRAIE – projet SIPIBEL)

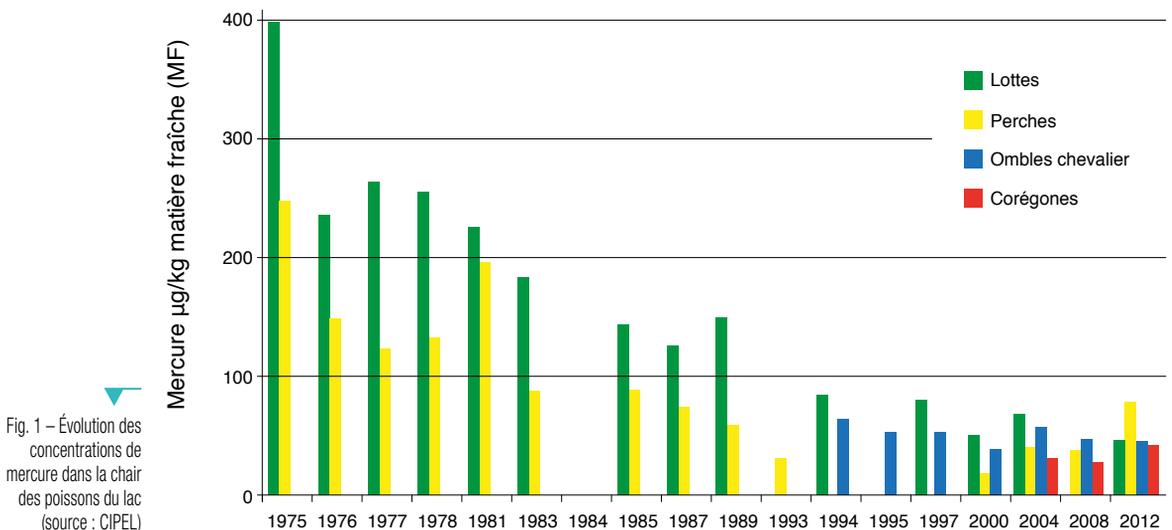


Fig. 1 – Évolution des concentrations de mercure dans la chair des poissons du lac (source : CIPEL)

## Les choix du passé...

L'impact de chaque source de micropolluant diffère d'un lac à l'autre selon les choix d'assainissement et d'implantation du tissu industriel.

**Pour le Léman**, les 171 stations d'épuration urbaines et les quelques stations d'épuration industrielles (phytosanitaires et pharmaceutiques) réparties le long de la vallée du Rhône en amont du lac, sont à l'origine d'apports non négligeables de micropolluants au lac.

Dans les années 1970, le Léman a connu un épisode de pollution industrielle majeure au mercure. Des mesures énergiques prises par les autorités cantonales auprès des industries, suivies par l'interdiction presque totale d'utilisation de ce produit, ont permis de résoudre ce problème.

**Le lac du Bourget** est alimenté par trois affluents principaux qui traversent Chambéry pour la Leysse et Aix-les-Bains pour le Sierroz et le Tillet. Ces deux agglomérations et leurs zones d'activités industrielles, situées en amont du lac, influencent la qualité des eaux du lac. Quelques substances quantifiées confirment l'impact de l'activité industrielle. Leur concentration est en dessous des valeurs réglementaires pour les usages de l'eau, sauf pour les PCB, dont l'origine est à relier à une activité industrielle historique, maintenant abandonnée, de production de transformateurs électriques au Pyralène<sup>TM</sup> sur les bords du Tillet.

**Pour le lac d'Annecy**, le collecteur d'eaux usées situé sous la route bordant le lac, récupère les rejets de toutes les communes du bassin versant dont ceux de l'agglomération principale située en aval du lac, pour les acheminer vers l'usine de dépollution des eaux du SILA. Cette dernière rejette les effluents traités dans le Fier, à l'aval du lac. À ce jour, les micropolluants quantifiés dans le lac à l'état de traces n'ont pas pour origine l'activité industrielle du bassin versant.

**Le lac d'Aiguebelette** ne fait l'objet d'aucune pression industrielle. Toutefois, la présence de l'auto-route A43 à proximité du lac induit un risque de pollution accidentelle en lien avec le transport de matières dangereuses. Cependant, en cas d'accident, un dispositif d'alerte est automatiquement déclenché permettant un confinement de la pollution dans plusieurs bassins de rétention. Sur la route départementale qui longe le lac, le transport de matières dangereuses est interdit par arrêté préfectoral.



Photo 2 – L'Albanne traversant une zone industrielle (© C. Guay)

## ... et ceux du présent

Les stations d'épuration actuelles, qu'elles fonctionnent avec des procédés biologiques ou physico-chimiques, ont des limites en termes de performances. Deux solutions existent pour réduire les rejets d'eaux épurées contenant encore des micropolluants :

- **la mise en place d'un traitement spécifique supplémentaire**, tel que l'ozonation ou l'adsorption sur charbon actif. La Suisse équipe actuellement une centaine de stations d'épuration de ces procédés ;
- **la réduction à la source des composés chimiques nocifs pour le milieu aquatique**. Cette stratégie, privilégiée en France, se concrétise par des opérations collectives de réduction des pollutions toxiques dispersées.

## Ce qu'il faut retenir

**Les lacs alpins ont fait l'objet de mesures de gestion qui ont permis de réduire fortement les impacts liés aux rejets industriels. Cependant, le développement économique et industriel des bassins versants, l'apparition de nouvelles molécules et la rémanence de certains composés rendent nécessaire le maintien de mesures de réduction des flux polluants et de la surveillance des milieux lacustres.**

# Les lacs sont-ils affectés par la pollution atmosphérique ?

► Emmanuel Naffrechoux et Jean-Luc Besombes, Université Savoie-Mont-Blanc, LCME •

**L'atmosphère constitue un vecteur de polluants émis sur les lieux occupés par l'homme vers des sites récepteurs parfois éloignés. Ce mode de transport contribue à la contamination des milieux aquatiques par des concentrations de polluants faibles mais variables. Certains lacs semblent propres alors qu'ils sont pollués par des sels nutritifs ou des molécules toxiques, pouvant affecter l'écologie lacustre.**

## La nature et les sources des pollutions

Particules fines, oxydes de soufre ou d'azote, Composés Organiques Volatils (COV), toxiques (HAP\*, PCB\*, pesticides...) ou éléments-traces métalliques (mercure, cadmium, arsenic...) sont des composés présents dans l'atmosphère. Si des efforts ont été faits depuis les années 1970 pour diminuer les émissions dans l'air, le transfert aérien de ces substances aux écosystèmes aquatiques est une réalité.

Les COV sont émis par des sources multiples : activité industrielle, transport, activité domestique (chauffage). La combustion des carburants et les émissions industrielles sont les principales sources d'oxydes de soufre et d'azote, et d'éléments-traces métalliques. Dans les grands lacs alpins français, les teneurs rencontrées restent très faibles et ne posent aucun problème environnemental ou sanitaire.

**Les émissions automobiles et le chauffage sont principalement responsables de la présence des HAP**, détectés à l'état de traces dans l'eau des lacs (0,25 g dans le volume équivalent à une piscine olympique), mais qui s'accumulent dans les sédiments (0,50 g dans 10 t de sédiments).

**Les sédiments des lacs alpins contiennent également des PCB**, molécules de synthèse très utilisées de 1950 à 1985 et maintenant interdites. Les quantités se déposant actuellement sur le fond du Léman et du lac d'Annecy sont très faibles et correspondent aux flux atmosphériques émis depuis des sites contaminés éloignés du bassin versant. Le lac du Bourget constitue une exception puisqu'il a subi jusqu'en 2013 les apports de PCB fixés sur les matières en suspension de l'un de ses affluents, pollué par une industrie locale. La concentration dans les sédiments déposés au point le plus profond de ce lac est encore 50 fois supérieure à celle mesurée dans les lacs soumis aux seuls dépôts atmosphériques.

## Les processus en jeu

De nombreux polluants sont associés aux particules fines en suspension dans l'air, transportées loin des sources d'émission par les courants aériens (fig. 1). La sédimentation directe de ces particules sur les étendues d'eau

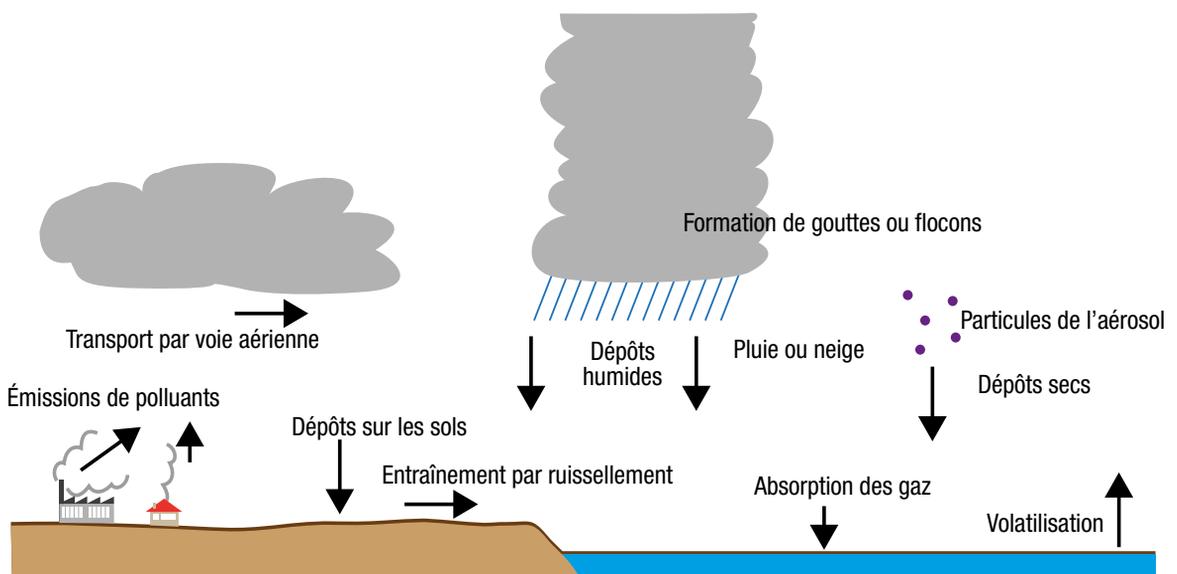


Fig. 1 – Représentation schématique du transfert des polluants atmosphériques aux lacs (source : E. Naffrechoux)



Photo 1 – Inversion hivernale de l'évolution de la température de l'air avec l'altitude (matérialisée par la couche nuageuse horizontale) favorisant le transfert des polluants atmosphériques au lac du Bourget © J.-L. Besombes

correspond au mécanisme de dépôt sec de polluants. Ces particules fines jouent aussi le rôle de noyau de condensation dans l'atmosphère et permettent la formation de gouttes d'eau ou de flocons de neige qui « lessivent » l'air : on parle alors de dépôt humide de la pollution. Quant aux polluants atmosphériques présents sous forme gazeuse, ils peuvent se dissoudre directement à la surface du lac. Ce mécanisme, dit d'absorption, est favorisé par les températures basses et les fortes concentrations du polluant dans l'air.

Les conditions météorologiques en milieu alpin (inversion de température dans la basse atmosphère en hiver limitant la dispersion de la pollution dans l'air, précipitations neigeuses et pluvieuses abondantes) facilitent les transferts des polluants atmosphériques vers les sols. Les apports au lac sont contrôlés par des mécanismes de dissolution des substances déposées, d'érosion des sols, de remise en suspension des sédiments et d'érosion des berges des cours d'eau.

### Les quantités entrantes

Les scientifiques estiment que la moitié des polluants métalliques contenus dans les grands lacs nord-américains provient de l'atmosphère. Toutefois, les connaissances sur les flux de l'air aux lacs sont encore lacunaires. En ne considérant que les apports directs à la surface du lac, les quantités entrant annuellement dans les 4 lacs alpins varient de quelques grammes (pour les PCB, HAP, métaux) à plusieurs tonnes (pour le soufre ou l'azote). Ces quantités sont en diminution mais leurs effets sur les lacs se feront encore ressentir plusieurs années.

**HAP** *Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.*

**PCB** *Polychlorobiphényles, aussi appelés biphényles polychlorés.*

**Anthropique** *Relatif à l'activité humaine.*

### Ce qu'il faut retenir

**Les polluants présents dans l'air sont émis par différentes sources anthropiques\*. Ils sont transportés par les courants atmosphériques puis déposés sur les sols des bassins versants ou à la surface des lacs. Les apports varient selon la nature des polluants, la taille et la structure du bassin versant, la superficie du lac et les saisons. Les concentrations dans l'eau sont faibles mais peuvent entraîner des effets néfastes à la vie aquatique ou aux usages de l'eau.**

# Que deviennent les micropolluants introduits dans les lacs ? Quels sont les risques associés ?

► Emmanuel Naffrechoux, Université Savoie-Mont-Blanc, LCME • Cyril Bourg, DREAL Rhône-Alpes • Nathalie Chèvre, Faculté des Géosciences de l'Environnement de Lausanne • Didier Ortelli, SCAV, État de Genève •

**Le développement des techniques analytiques depuis le milieu des années 2000 a mis en évidence la pollution des systèmes lacustres par une multitude de substances chimiques. Issues principalement de nos activités quotidiennes et communément appelées micropolluants\*, ces substances entrent dans les lacs majoritairement via les eaux usées et les eaux de ruissellement urbaines et agricoles. Elles ont des origines et des caractéristiques variées qui déterminent leur devenir dans les lacs. La question se pose quant aux effets sur les écosystèmes et sur la santé humaine d'une telle pollution.**

## Des disparités spatiales

Si les lacs présentent en moyenne des concentrations faibles, les embouchures des cours d'eau et les dispositifs de rejets directs d'eaux pluviales ou de ruissellement de surfaces imperméabilisées, sont des zones préférentielles de plus fortes concentrations pour la plupart des composés.

Ainsi les embouchures de la Leysse, du Tillet, voire du Belle-Eau sont des zones d'apports privilégiées au lac du Bourget, en lien avec les activités amont ou le lessivage de sites pollués.

Dans un lac, la répartition des substances est fortement dépendante des conditions de mélange des eaux qui s'expriment à différentes échelles (voir question 1-05 : *Y a-t-il des courants et des marées dans les lacs ?*). La baie de Vidy du Léman, qui réceptionne les effluents du bassin de Lausanne, fait l'objet d'études qui caractérisent le devenir des micropolluants.

Pour certains produits médicamenteux, en plus de la distance au rejet principal, les concentrations observées dans la baie dépendent de la stratification du lac. Une partie de l'année, le panache du rejet de la station d'épuration se trouve piégé en profondeur, ce qui empêche la photo-dégradation\* de certains micropolluants organiques dans les couches de surface. Dans cette dynamique liée aux caractéristiques physiques de la masse d'eau, les vents jouent un rôle primordial.

Pour les pesticides, la plus grande homogénéité des concentrations est liée à la présence d'apports diffus depuis les rives. On estime ainsi à 190 kg la quantité de glyphosate, un herbicide qui arrive dans le Léman chaque année en raison du traitement du vignoble du Lavaux entre Lausanne et Vevey (photo 1). Quelques 250 phytosanitaires sont recherchés au printemps et en automne au milieu du Léman à différentes profondeurs. Une cinquantaine de substances ainsi que des métabolites ont été détectés, provenant de sources agricoles et industrielles (fig. 1).

Parmi les nouveaux contaminants dits émergents, citons les médicaments : sur la soixantaine de substances, une dizaine sont régulièrement détectées au milieu du lac. C'est le cas de la metformine, un antidiabétique, quantifié à près de 0,3 µg/l, ce qui, rapporté au volume du lac, correspond à près de 30 t de substance active ! Les sources sont à la fois industrielles et urbaines.

## Leur piégeage par les sédiments

La capacité des sédiments (fig. 2) à stocker des polluants dépend d'une caractéristique chimique essentielle des substances : leur solubilité dans l'eau. On ne retrouve donc pas les mêmes familles de composés dans l'eau et dans les sédiments.

Les substances organiques les moins solubles (PCB, HAP, certains pesticides) se fixent aux particules alors que les métaux précipitent sous différentes formes. La décantation de ces matières solides entraîne l'accumulation des

**Historiquement employés dans une multitude d'applications allant des encres et vernis aux condensateurs et transformateurs, les PCB (polychlorobiphényles), extrêmement persistants dans la nature, sont revenus sur le devant de la scène lorsque les seuils sanitaires pour les poissons destinés à la consommation ont été révisés à la baisse (en 2006, puis 2012).**

**Aujourd'hui, le niveau d'imprégnation des poissons est inférieur à ces seuils, hormis dans le lac du Bourget où persiste une contamination marquée – largement issue du Tillet aujourd'hui réhabilité.**

**Une mesure d'interdiction de pêche concerne les espèces qui accumulent le plus ces composés, dont l'omble chevalier.**

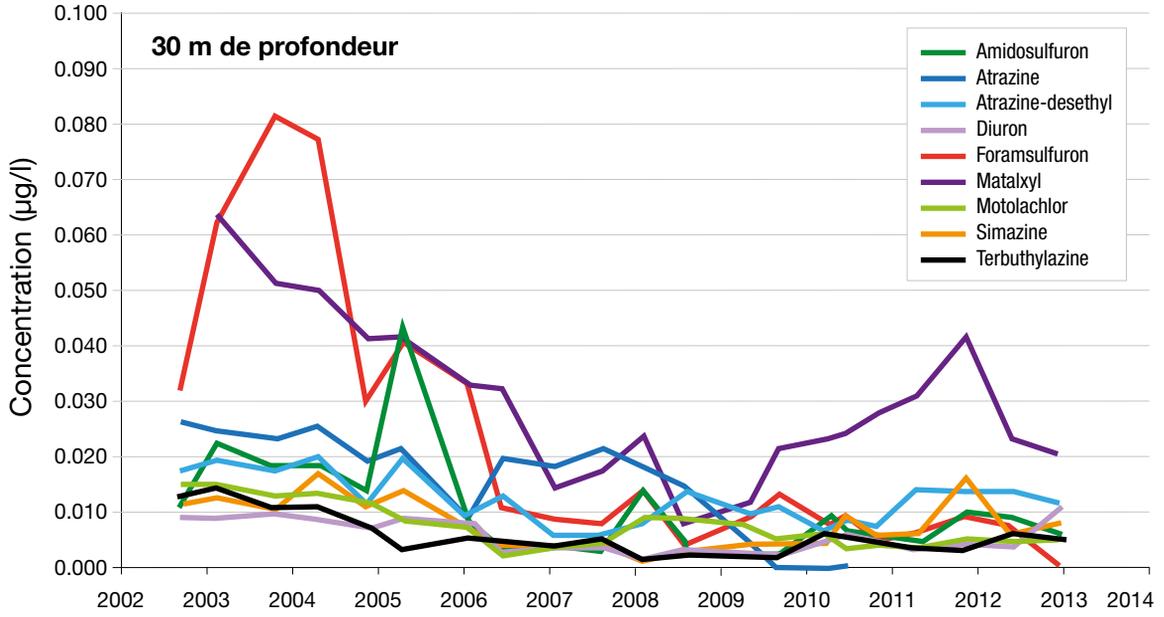
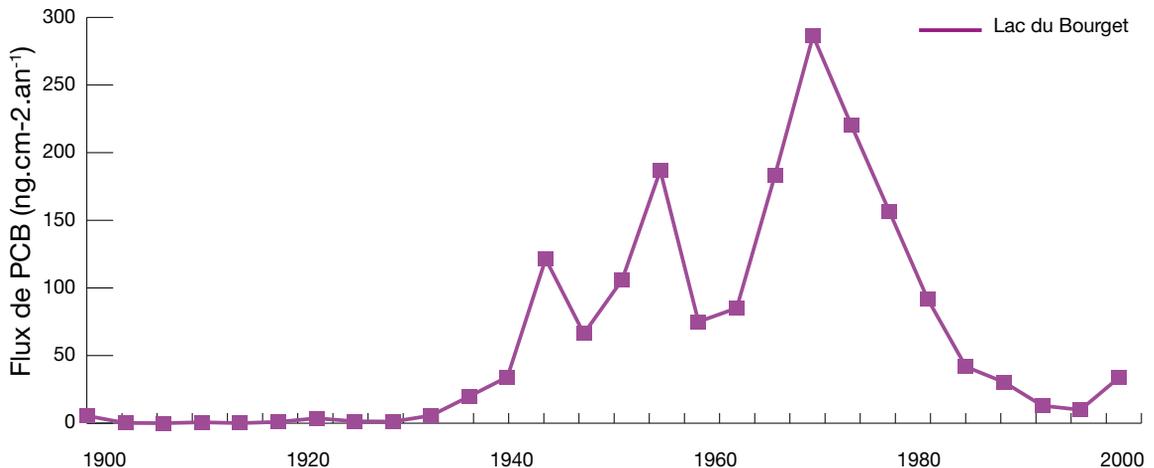
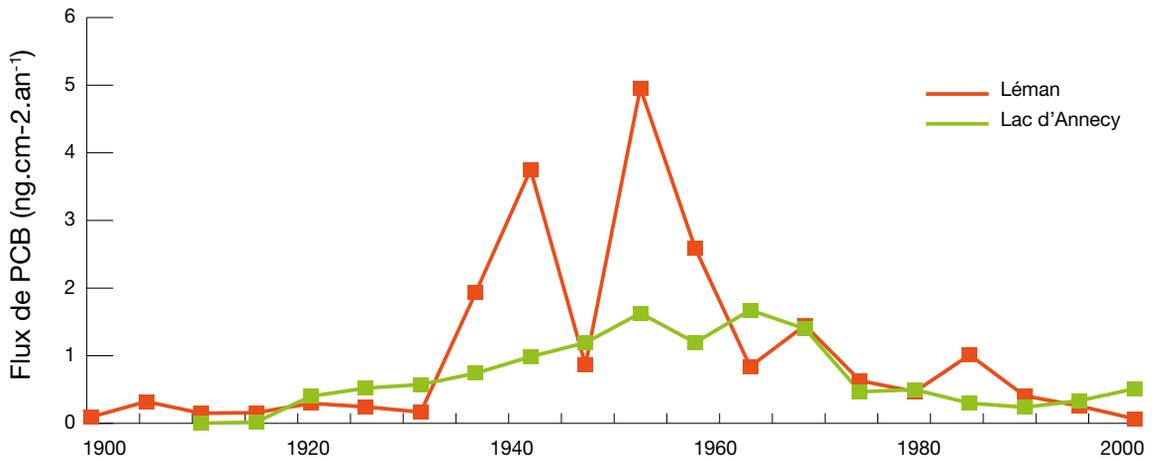


Fig. 1 – Évolution de la concentration de micropolluants régulièrement détectés dans le Léman, à la profondeur de prélèvement des stations de pompage pour la production d'eau potable (source : CIPEL)

Fig. 2 – Flux d'enrichissement en PCB des sédiments lacustres du Léman et des lacs d'Annecy et du Bourget (source : E. Naffrechoux)



micropolluants au fond des lacs, dans les sédiments. Contrairement aux cours d'eau où la reprise par les crues peut provoquer un transfert vers l'aval, les lacs archivent durablement cette pollution : l'étude de carottes sédimentaires\* permet de reconstituer l'histoire de la contamination par certains composés et de la comparer à l'état actuel. Ainsi, une analyse menée sur le lac du Bourget a permis de caractériser l'évolution des contaminations pour les PCB, les HAP, quelques métaux et des composés bromés.

La tendance actuelle pour ces substances est à la baisse sauf pour les composés bromés dont les concentrations augmentent, mais restent faibles. Pour les PCB, les fortes concentrations historiques témoignent d'une contribution industrielle locale, alors que les métaux et les HAP ont été (et continuent) d'être apportés par différentes voies (affluents, dépôts atmosphériques, lessivage des chaussées, etc.). Dans l'ensemble, les concentrations en PCB et HAP sont plus élevées dans le lac du Bourget que dans le lac d'Annecy et le Léman en raison d'apports plus importants.

### Leurs effets sur les écosystèmes lacustres

L'eau et les sédiments sont les compartiments à partir desquels les organismes sont susceptibles de se contaminer et d'assimiler, voire de concentrer, ces polluants.

Le risque lié à ces substances résulte de la combinaison de l'exposition (temps de contact entre un organisme et une substance) et de l'effet (conséquence biologique).

Les polluants peuvent se transférer le long de la chaîne alimentaire, avec parfois une bioamplification (fig. 3) (les concentrations augmentent de la proie vers son prédateur), comme cela a été montré pour certains métaux comme le mercure et certains produits organiques tels que les PCB. Le niveau actuel de contamination des lacs alpins est faible, ne générant pas d'effet environnemental direct visible.

Pris individuellement, les micropolluants retrouvés dans les eaux du Léman, des lacs d'Annecy et du Bourget ne semblent donc pas présenter de risques à court terme, à l'exception de quelques composés tels que les herbicides présents dans le Léman, toxiques en particulier pour les algues ou les PCB dans le lac du Bourget.

La situation est différente en présence de mélanges de micropolluants. En effet, le simple fait que des dizaines de substances soient présentes simultanément, même à de très faibles concentrations, peut accroître le risque pour les espèces aquatiques. Il faut ajouter de nombreuses inconnues, liées à la variété des organismes vivants ayant des sensibilités différentes ou encore à la différence de sensibilité en fonction des stades de développement de ces organismes. Il existe peu de connaissances sur les risques sur plusieurs générations et leur possible cumul à d'autres risques liés au changement climatique.

### Leurs risques pour la santé humaine

L'être humain peut être exposé à ces micropolluants principalement à travers la nourriture, notamment les poissons et l'eau potable. Selon les substances, les risques, en cas d'expositions élevées, peuvent être variés : cancers, modifications hormonales, malformations fœtales. Les PCB ont ainsi été dosés en quantités importantes dans certains poissons du Léman et du lac du Bourget (supérieures aux normes sanitaires de consommation), en

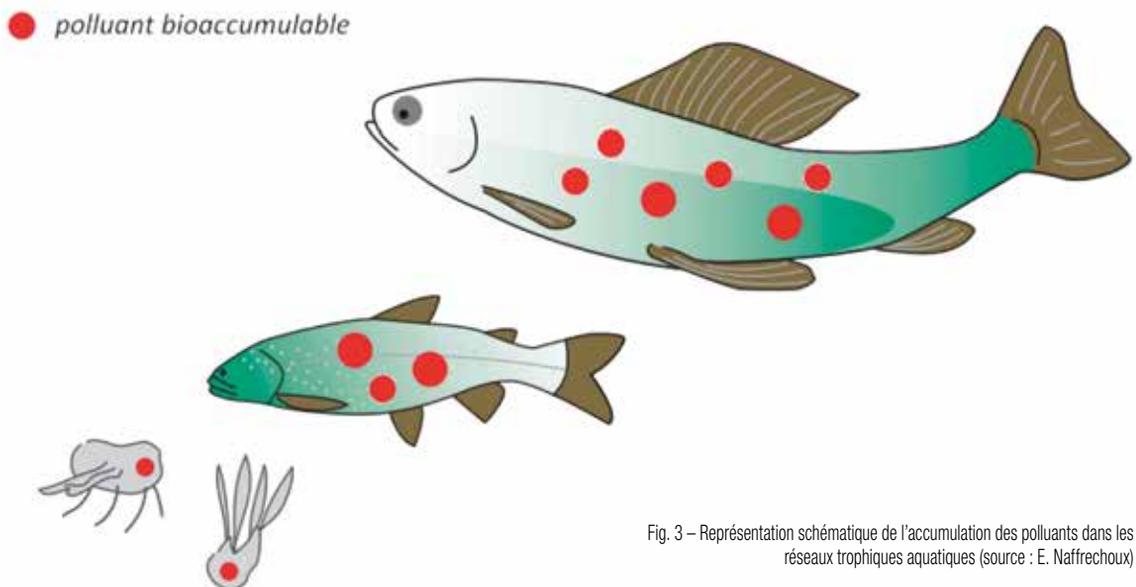


Fig. 3 – Représentation schématique de l'accumulation des polluants dans les réseaux trophiques aquatiques (source : E. Naffrechoux)



Photo 1 – Vignoble de Lavaux illustrant les risques de transferts de produits phytosanitaires d'origine agricole (© J.-M. Zellweger)

particulier chez les poissons âgés, gras, et situés au sommet de la chaîne trophique tel que l'omble chevalier. Ceci a donc conduit à des restrictions de pêche.

La question des risques liés à la consommation d'eau potable issue de lacs est, elle, toujours en discussion. Mais les normes de qualité actuelles sont très restrictives et protectrices pour le consommateur : par exemple, pour les PCB, il faudrait boire plus de 100 litres d'eau non traitée du lac du Bourget par jour pour dépasser la dose maximale journalière admissible.

Il existe par ailleurs des moyens de potabilisation de l'eau qui permettent de supprimer efficacement les micropolluants dans l'eau potable. Le risque pour la santé humaine lié à la consommation d'eau potable issue des lacs est donc faible (voir question 3-01 : *L'eau des lacs : peut-on la boire et s'y baigner ?*).

**Micropolluants** Composés présents à des concentrations inférieures ou égales au microgramme par litre dans l'eau – ou microgramme par kilogramme dans les sédiments.

**Photo-dégradation** Dégradation d'une molécule par l'absorption de photon, notamment émis par le soleil.

**Carotte sédimentaire** Échantillon stratifié de sédiments qui permet l'analyse datée des constituants du sédiment.

## Ce qu'il faut retenir

**Les systèmes lacustres en milieu anthropisé sont pollués par de nombreuses substances chimiques, généralement présentes en quantités très faibles, dont le devenir dépend de leurs caractéristiques propres et de leur environnement. Il est actuellement impossible de prédire leurs éventuels risques à long terme pour la santé des lacs et sur la potabilisation de leur eau.**

# Les lacs sont-ils toujours menacés par le phosphore ?

► Jean-Marcel Dorioz, INRA CARTELE • Michel Lafforgue, SAFEGE • Dominique Trévisan, INRA CARTELE •

**L'eutrophisation est une pollution des plans d'eau par le phosphore. Cette menace a pesé sur les lacs alpins dans les années 1960 à 1990. Les actions entreprises semblent les avoir tirés d'affaire. Sont-ils à l'abri d'une rechute ?**

## Le phosphore : un élément clé de la dynamique des lacs

Un lac ayant une charge modérée en phosphore est oligotrophe, la quantité d'algues (biomasse) produite est faible. Les lacs eutrophes, trop nourris en phosphore, produisent une biomasse algale importante qui désorganise l'écosystème dans son ensemble. Les fonctions du lac (production piscicole, recyclage) et ses usages (alimentation en eau potable, pêche, baignade) peuvent alors être perturbés. Le phosphore provient en général du bassin versant. Les flux transférés sont largement dopés par la croissance des activités humaines.

## Des lacs en convalescence

Les lacs alpins, excepté le lac d'Aiguebelette, sont passés d'un état oligotrophe à des états plus ou moins eutrophes, à partir des années 1950 avec un pic d'eutrophisation dans les années 1980. L'augmentation des rejets d'eaux usées domestiques, elle-même conséquence de l'urbanisation, de l'accroissement de la population et de l'usage de lessives avec phosphates, est la cause principale de cette évolution. Les flux diffus dus aux pertes des sols agricoles n'ont eu qu'un rôle secondaire.

Les mesures de maîtrise des flux de phosphore ont consisté à améliorer la collecte des effluents et leur traitement dans des stations d'épuration avant rejet, à interdire l'usage des phosphates dans les lessives (dès 1986 en Suisse, 2007 en France), à transférer une partie des rejets urbains traités à l'aval des lacs d'Annecy et du Bourget.

Les mesures drastiques (ceinturage du lac par un collecteur de tous rejets domestiques) et précoces (1962) prises pour Annecy ont permis d'obtenir des résultats rapides (« une ré-oligotrophisation\* »). Pour le Léman et le lac du Bourget, les mesures ont été plus tardives (rejet des eaux usées traitées de Chambéry et Aix-les-Bains au Rhône, à l'aval du lac du Bourget, en 1980). Les améliorations ne se sont fait sentir que progressivement.

La baisse obtenue entre 1990 et 2000 en matière de phosphore est spectaculaire, mais des pics de biomasse algale persistent. Les communautés biologiques ne reviennent pas à l'état souhaité et l'anoxie benthique\* continue à se maintenir sur de longues périodes. L'écosystème lacustre est restauré mais il a changé. C'est un convalescent qui se trouve soumis aux effets du réchauffement climatique et à la pression des flux de phosphore résiduels (fig. 1).

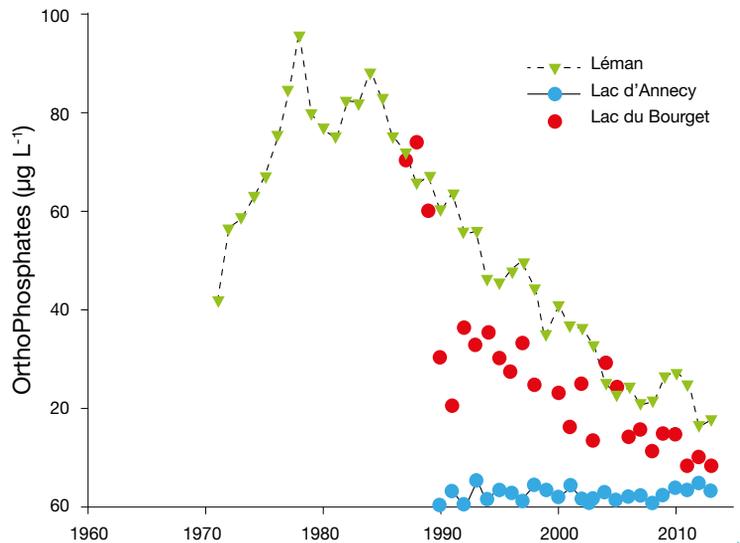


Fig. 1 – Évolution de la concentration des orthophosphates à la date de la plus forte homogénéisation de la colonne d'eau (février-mars). Pour le Léman, le brassage n'est souvent que partiel (source : S. Jacquet)

## Des flux de phosphore durablement stabilisés

Les flux totaux en phosphore entrant dans les grands lacs sont désormais stabilisés à un niveau plutôt faible.

- La maîtrise des flux dus aux eaux usées semble assurée. Il persiste cependant un risque résiduel avec le développement du mitage périurbain qui accroît la proportion de rejets difficiles à contrôler car dispersés.
- La situation est plus complexe pour les flux diffus.

**Les flux de phosphore diffus agricole**, sont très sensibles aux conditions d'écoulement des eaux de surface et aux pratiques culturales. La vigilance s'impose face à l'intensification relative de l'agriculture (photo 1) et à

la simplification du parcellaire, du réseau hydrographique, qui accompagne le mitage des zones rurales proches des lacs. Il existe une tendance générale à l'accroissement des teneurs en phosphore des sols cultivés; elle résulte du cumul, sur des années, de bilans excédentaires en phosphore des exploitations agricoles.

**Il existe aussi des flux diffus urbains** (photo 2) (voir question 3-04 : *Quelle est la pression de l'urbanisation sur la qualité de l'eau des lacs?*), dont l'augmentation semble inexorable.

### Des milieux qui restent vulnérables

Le risque de pollution massive étant écarté, la vulnérabilité au phosphore de nos systèmes lacustres résulte du couplage de facteurs de risque faibles agissant simultanément sur les lacs et leurs bassins versants. Le scénario d'une hausse modérée des transferts de phosphore due au renforcement des flux diffus et qui réactiverait l'eutrophisation de lacs sensibilisés par leurs passés et le réchauffement climatique, est plausible. Le phénomène clé induisant l'augmentation du diffus, pourrait être la conjonction entre des sols de plus en plus riches en phosphore et l'accroissement des connexions entre ces sols et les lacs du fait des aménagements du réseau hydrographique et de l'imperméabilisation des surfaces. Une telle situation aboutirait notamment à une augmentation des flux transférés en été, période favorable à la croissance algale.

D'autres changements pourraient amplifier ces dynamiques défavorables. C'est le cas

de la désoxygénation partielle du fond devenue chronique du fait d'hivers moins froids et donc de brassage moins fréquents (voir question 1-04 : *Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette?*). Ce phénomène ouvre la porte à des libérations de phosphore piégé dans les sédiments.



Photo 1 – Vue aérienne du Léman, mitage urbain (© J.-M. Zellweger)



Photo 2 – Mitage urbain sur le bassin versant du lac du Bourget (© CIALB)

### Ce qu'il faut retenir

Les efforts réalisés ont permis de baisser les teneurs en phosphore et d'améliorer l'état trophique des lacs. Ce résultat est à consolider face à plusieurs risques de déstabilisation : tendance à l'accroissement des volumes d'eaux usées à traiter, d'apports diffus urbains, des stocks dans certains sols agricoles.

**Ré-oligotrophisation** *Phénomène d'appauvrissement progressif d'un milieu en éléments nutritifs.*

**Anoxie benthique** *Absence d'oxygène pour les invertébrés vivant au fond des lacs.*

# Quel est l'effet du salage des routes sur les lacs ?

► Adrien Gaudard et Luiz Felipe de Alencastro, EPFL • Emmanuel Naffrechoux, Université Savoie-Mont-Blanc, LCME •

**Assurer la permanence de la circulation routière en hiver en zone de montagne implique la mise en œuvre de moyens techniques, combinant des méthodes mécaniques (chasse-neige) et des méthodes chimiques. Le salage, dont le rôle est d'abaisser le point de congélation de l'eau, peut avoir des impacts sur l'environnement aquatique car les composés utilisés sont très solubles dans l'eau.**

## Le sel utilisé

Le sel de déneigement est majoritairement constitué de chlorure de sodium (NaCl), auquel on ajoute, selon la température et l'humidité de la neige à fondre, des quantités variables de chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) ou de magnésium ( $\text{MgCl}_2$ ). Des impuretés, sous forme d'éléments à l'état de traces, sont inévitablement présentes : phosphore, soufre, azote, cuivre et zinc.

Ce mélange est épandu sur les chaussées sous forme solide, liquide (saumure), ou en mélange (solide dans une saumure), à raison d'environ 80 à 150 kg par km de route à double voie.

## Son devenir dans l'environnement

Très solubles et stables dans l'eau, les constituants ioniques du sel ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}_2^+$ ,  $\text{Mg}_2^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) sont entraînés par les eaux ruisselant sur la chaussée et peuvent rejoindre les cours d'eau et les lacs. Le lac recevra d'autant plus d'apports que la densité routière de son bassin versant est grande et que les chaussées sont connectées au réseau hydrique (fossés, ruisseaux, rivières et finalement les lacs).

Le Léman est soumis aux apports en sel de déneigement, qui contribuent à environ 1/5 de la concentration en chlorures  $\text{Cl}^-$  de l'eau (fig. 1), l'essentiel du sel étant issu des activités industrielles.

Même si le salage des routes n'est donc pas le seul responsable de cet apport, tous les lacs alpins voient leur concentration en chlorure augmenter depuis 40 ans

(fig. 2). Le lac d'Aiguebelette, dont le sel de déneigement en est la source quasi-exclusive, présente une augmentation moins régulière, probablement expliquée par un temps de séjour plus court de l'eau dans le lac et par les fluctuations des quantités utilisées pour le déneigement de l'autoroute située à sa proximité directe.

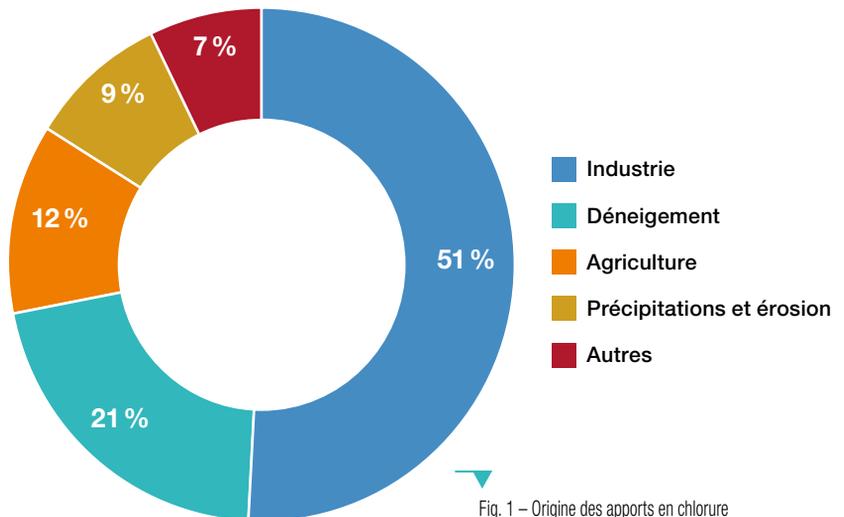


Fig. 1 – Origine des apports en chlorure dans le Léman, par importance (source : Gummy et L. F. De Alencastro 2001, A. Gaudard, 2012)

## Ses effets sur le lac

Les ions résultant de la dissolution du sel de déneigement sont déjà tous présents dans les eaux naturelles et sont essentiels à la bonne santé des organismes. Toutefois, l'augmentation de leur concentration peut avoir des conséquences néfastes. L'ion  $\text{Cl}^-$  devient dangereux pour la faune et la flore aquatiques à partir d'une exposition continue à une concentration de 250 mg/l et peut entraîner une réduction de la productivité biologique.

Des concentrations plus faibles peuvent avoir un effet sur la structure des populations et des communautés d'algues. Très soluble dans l'eau et peu réactif chimiquement, aucun mécanisme naturel ne peut atténuer rapidement la concentration de cet ion dans un lac. La concentration dans le Léman est ainsi passée de moins de 3 mg/l dans les années 1970 à près de 10 mg/l aujourd'hui.

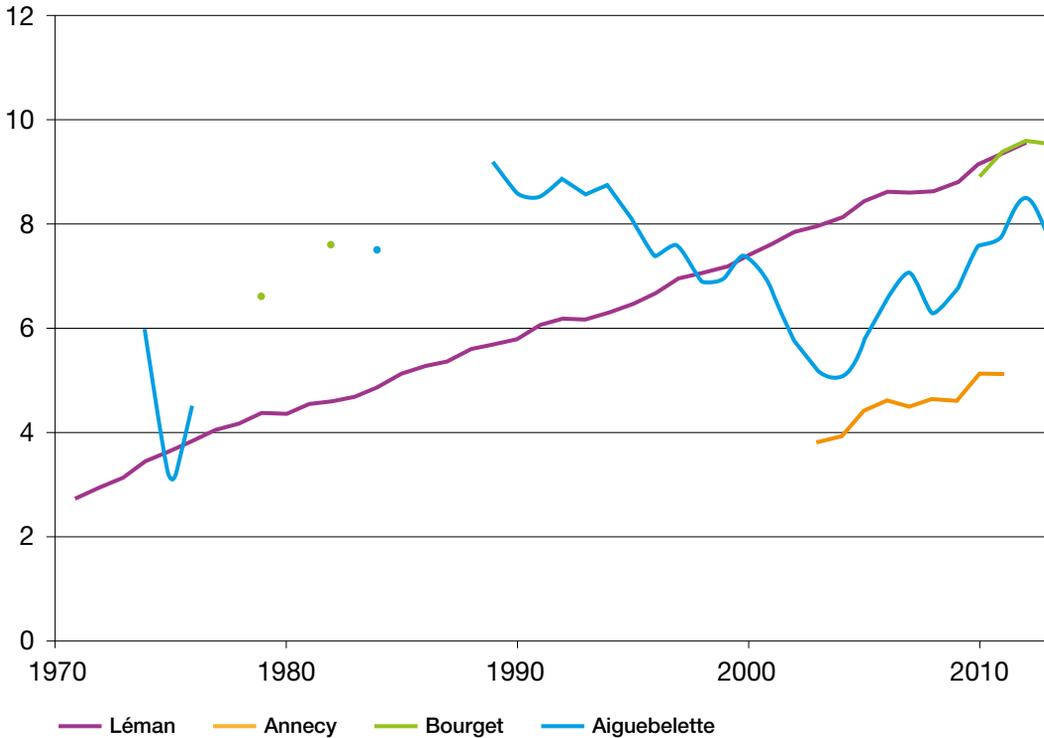


Fig. 2 – Évolution de la concentration moyenne en ion chlorure dans les lacs alpins (en mg/l) (source : J. Lazzaroto et A. Klein, 2012)

**Aucun effet sur les organismes des lacs alpins n'est mesurable.** Toutefois, la présence de chlorure de sodium augmente la mobilité des métaux présents sur les routes (notamment le cadmium, le zinc, le cuivre et le plomb toxiques à faible dose). Par ailleurs, une hausse de la salinité induit une augmentation de la densité de l'eau.

### Comment limiter l'impact sur le lac du déneigement des routes ?

Le sel ne doit être utilisé que pour faire fondre la neige que l'on ne parvient pas à retirer mécaniquement avec les engins d'entretien. L'étude de l'état de la surface de la route permet d'adapter la quantité de sel à épandre. L'épandage de sel humidifié, plus vite actif, limite les quantités épandues. La prise en compte de la largeur de chaussée, de la pente et des vents dominants permet enfin de limiter la quantité perdue par éclaboussures.

Les écoulements de la chaussée des grands axes routiers doivent être dirigés vers des zones enherbées pour limiter les atteintes aux zones sensibles (cultures, ruisseaux, rivières et eaux stagnantes). Les zones de stockage peuvent être couvertes pour limiter les flux de ruissellement comme c'est le cas au lac d'Aiguebelette où AREA dispose d'un stock important de sel pour traiter la portion de l'autoroute située entre le tunnel de Lépine et celui de Dullin.

Des produits alternatifs au sel de déneigement sont actuellement testés mais ils souffrent souvent d'inconvénients non négligeables, notamment un faible temps d'action et une accumulation en bord de routes pour les produits solides (graviers, copeaux), ou un effet néfaste aux eaux de surface pour les composés organiques (acétate ou formiate de potassium, urée) lors de leur (bio) dégradation.

### Ce qu'il faut retenir

**Le déneigement des routes est une source de chlorures pour les lacs alpins. Les teneurs augmentent de manière régulière mais n'entraînent actuellement pas d'effet négatif observable dans l'écosystème lacustre. Toutefois, il est souhaitable de limiter les apports aux lacs ou de développer des solutions alternatives.**

