



Plage Saint-Saphirin au bord du Léman © Domaine du Barignon

Changement global

Quel avenir pour les lacs dans un demi-siècle ?

► Thomas Pelte, Agence de l'Eau RMC •

*Ô poétique mer ! Il est dans cet esquif
Plus d'un cœur qui comprend ton murmure plaintif.*

Ces deux vers empruntés à Alphonse de Lamartine pour désigner le Léman (extrait de *Ressouvenir du lac Léman*) expriment, de façon imagée, l'attrait des lacs conjugué à leur vulnérabilité, deux facteurs qui caractérisent ces milieux aquatiques. Leur position de réceptacle de bassins hydrographiques et le renouvellement lent de leur eau expliquent que ces milieux se comportent comme des réacteurs qui intègrent les pressions auxquelles ils sont soumis. Ils peuvent très rapidement être dégradés. Leur restauration et leur convalescence s'avèrent en général extrêmement longues, de l'ordre de plusieurs décennies.

Après environ 40 années consacrées à maîtriser les pressions connues sur les grands lacs, il est aujourd'hui pertinent de s'interroger sur les décennies futures et les menaces nouvelles d'ores et déjà constatées ou pressenties.

Pour les grands lacs alpins, un adage s'impose plus que tout autre : mieux vaut prévenir que guérir

La prise de conscience de la vulnérabilité des grands lacs alpins a été liée aux incidences de l'eutrophisation* au milieu du xx^e siècle (voir question 7-01 : *Quels ont été les actes fondateurs de la protection des lacs ?*). C'est l'enjeu qui a mobilisé les décideurs locaux pour engager des actions destinées à maîtriser les menaces. Le premier niveau de réponse a été essentiellement de l'ordre de l'ingénierie : construction d'ouvrages de collecte, traitement et évacuation des pollutions, aménagements divers.

Aujourd'hui, la tendance à la dégradation a été infléchie et les ressources sont préservées. L'ingénierie, mobilisée initialement sur la question du traitement des pollutions organiques, s'est développée sur d'autres domaines d'intervention : pollutions diffuses agricoles, renaturation écologique, micropolluants.

Des menaces de natures nouvelles sont d'ores et déjà identifiables

Les vecteurs de dissémination d'espèces invasives sont beaucoup plus importants depuis environ 20 ans

Les territoires mondiaux sont interconnectés, les populations saisonnières augmentent sur les bassins versants des lacs, les flux de véhicules sont croissants. Il n'est donc pas étonnant de voir apparaître des espèces qualifiées d'exotiques dans les écosystèmes lacustres, milieux pourtant peu ouverts.

Les biologistes observent une progression inquiétante du nombre d'espèces invasives recensées en Europe (1500 espèces), laissant imaginer dans les prochaines décennies la disparition d'espèces autochtones ou encore une réduction de la biodiversité et des habitats (voir question 2-07 : *Les espèces invasives sont-elles dangereuses ?*).



Photo 1 – Renouée du Japon au bord du lac du Bourget (© CISALB)



Photo 2 – Région de Morges et Lausanne au nord et les Alpes savoyardes au sud
(© J.-M. Zellweger)

Le changement climatique en cours est avéré par les climatologues mondiaux

Les grands lacs alpins sont très concernés par les incidences possibles du changement climatique (voir question 8-02 : *Comment observer les changements à long terme?* et question 8-03 : *Les lacs sont-ils menacés par le changement climatique?*). D'une part, la température joue un rôle majeur de contrôle dans les multiples processus d'un écosystème lacustre. D'autre part, l'échelle temporelle d'évolution et de restauration des lacs, de l'ordre de plusieurs décennies, est aussi celle du changement climatique.

Les scientifiques et gestionnaires observent déjà des tendances évolutives tant sur les lacs que sur le bassin hydrographique qui les alimente, laissant supposer une influence majeure sur leur avenir. Par exemple, le maintien de l'omble chevalier, poisson d'eau froide emblématique des lacs alpins, serait menacé par un réchauffement de quelques degrés.

Des lacs à nouveau oligotrophes*

Certains lacs comme le Léman et le lac du Bourget, à court et moyen terme, retrouvent un fonctionnement oligotrophe avec des conséquences pour la gestion piscicole :

- une meilleure reproduction naturelle, interrogeant les politiques actuelles d'alevinage;
- une production globale des lacs moins importante et une croissance des poissons qui sera moins rapide qu'aujourd'hui, nécessitant certainement des adaptations pour les espèces les plus exploitées comme le corégone.

Des lacs de plus en plus attrayants

Cet attrait se traduit par deux phénomènes :

- la densification de la population sur les territoires alpins entraînant une extension urbaine (photo 2), accrue par l'évolution des comportements vis-à-vis de l'habitat (distance travail-domicile, résidences secondaires), engendrant un accroissement des pollutions et une régression des zones naturelles;
- la fréquentation touristique des zones de baignade tend à augmenter, posant des problèmes de surfréquentation du littoral et induisant le développement d'infrastructures nouvelles (parkings, collectes de déchets...), autant de sources d'altération possibles pour les lacs.

Eutrophisation *Enrichissement excessif du milieu aquatique en nutriments qui se traduit par l'envahissement de l'eau par une production végétale surabondante.*

Milieu oligotrophe *Pauvre en éléments nutritifs.*

Ce qu'il faut retenir

Il est difficile de proposer des scénarios pour le futur proche des lacs alpins, tant les effets combinés des pressions actuelles et futures sur les lacs sont complexes à prédire. Seule une poursuite des efforts engagés, adaptés aux futures menaces, permettra de maintenir la qualité actuelle de ces écosystèmes.

Comment observer les changements à long terme ?

► Bernard Montuelle et Marie-Elodie Perga, INRA CARRTEL • Jean-Philippe Jenny, Université Savoie-Mont-Blanc, EDYTEM •

Les lacs évoluent au cours du temps sous l'action des changements environnementaux, qui peuvent être lents (échelle du siècle) ou rapides (quelques années). Certaines évolutions sont visibles et mesurables au cours des saisons ou d'une année sur l'autre. Mais pour comprendre l'évolution d'un lac, il faut organiser les observations et les données décrivant plusieurs décennies, voire des siècles, puis les mettre en perspective : il s'agit en quelque sorte de passer d'une collection de photos à un film !

Les mesures directes : l'approche de la limnologie*

Depuis maintenant de nombreuses années, les scientifiques disposent d'outils de mesure qui permettent de caractériser l'état des systèmes lacustres, tant du point de vue de la chimie, que de la physique ou de la biologie. Avec les progrès techniques, nous sommes capables de plus en plus de précision, par exemple dans la description de la biodiversité, en biologie moléculaire (voir question 2-02 : *Y a-t-il des espèces microscopiques dans les lacs ?*) ou dans l'analyse de contaminants chimiques (pesticides, résidus de médicaments, voir question 3-03 : *Comment mesure-t-on la qualité de l'eau ?*). Actuellement, dans le cadre des suivis des lacs alpins, une trentaine de paramètres chimiques et biologiques sont étudiés de façon systématique.

À côté de cette capacité d'analyse, pour dresser une image précise de la dynamique d'un lac, il faut également organiser les prises d'échantillons (photo 1). Un suivi de qualité doit s'effectuer à un pas de temps proche de la dynamique temporelle du processus à étudier.

Ainsi, la compréhension de la dynamique écologique saisonnière nécessite des prélèvements fréquents, de mensuels à bi-hebdomadaires lors des saisons chaudes, pour lesquelles les changements sont rapides. Pour être comparables dans le temps, les données issues des différentes campagnes d'échantillonnage doivent aussi provenir d'un point de prélèvement commun, dont les coordonnées GPS sont relevées. Le choix du point de référence repose sur sa capacité à représenter au mieux les conditions dans la zone pélagique (pleine eau) du lac. En général, c'est le point au-dessus de la zone la plus profonde du lac, le plus éloigné de perturbations issues du bassin versant (embouchure de cours d'eau). Les données acquises de façon récurrente sur trois grands lacs (depuis 50 ans pour le Léman et le lac d'Annecy, une vingtaine d'années pour le lac du Bourget) alimentent des chroniques dont l'analyse permet d'évaluer les changements physiques, chimiques ou biologiques des lacs, et surtout les causes humaines ou naturelles de ces changements.



Photo 1 – Prélèvements effectués sur le Léman
(© INRA – C. Maître)

Ainsi ont pu être mis en évidence :

- l'efficacité des mesures prises à l'échelle du bassin versant sur la réduction des concentrations internes en phosphore (fig. 1);
- l'effet du changement climatique sur la dynamique des eaux : l'impact se traduit plutôt par des modifications de la durée de la stratification plutôt que par une augmentation unique de la température de l'eau;
- l'effet de l'amélioration de la qualité de l'eau sur les populations de corégones dans le lac du Bourget (fig. 2).

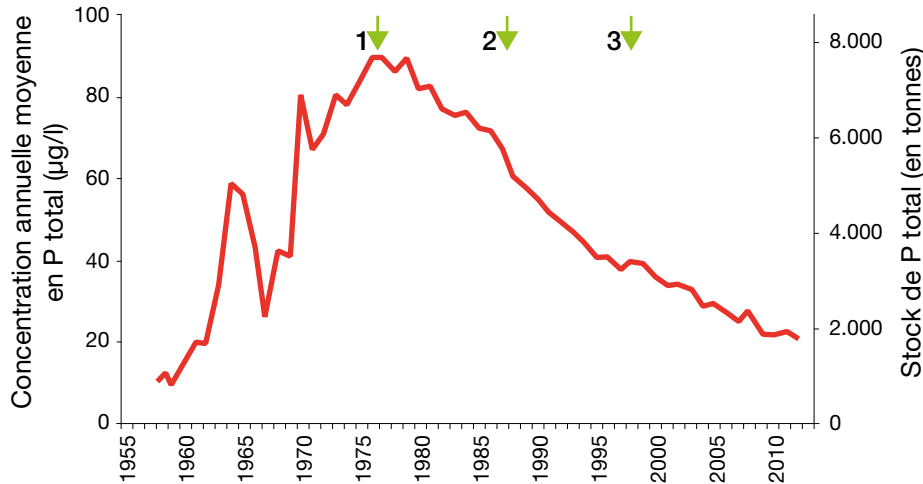


Fig. 1 – Évolution de la teneur en phosphore dans le Léman lors des 50 dernières années (source : CIPEL – INRA/SOERE)
 1 : Début du traitement du phosphore des eaux résiduaires en station d'épuration
 2 : Interdiction des phosphates dans les lessives en Suisse
 3 : Interdiction des phosphates dans les lessives en France

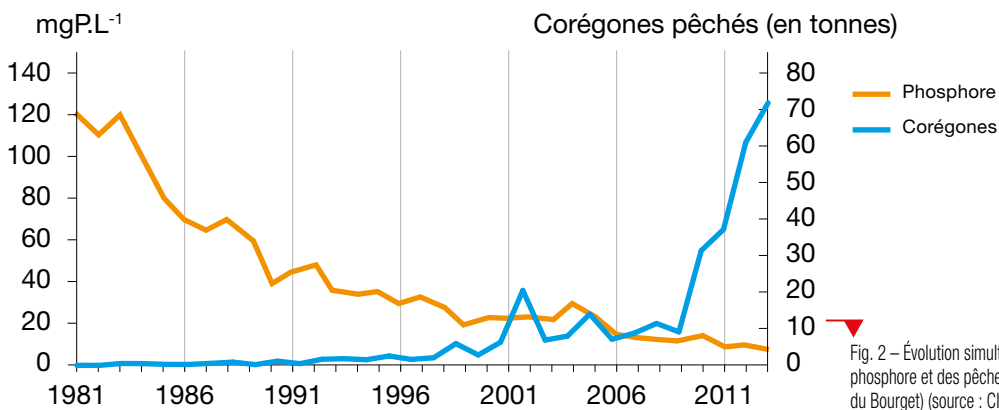


Fig. 2 – Évolution simultanée des teneurs en phosphore et des pêches de corégones (lac du Bourget) (source : CISALB – INRA/OLA)

Comment faire sans mesure directe ? L'apport de la paléolimnologie

Une tendance climatique se définit sur au moins 30 ans. Comprendre l'effet du climat sur les écosystèmes nécessite des séries de données au moins aussi longues.

Pour des lacs qui subissent dans le même temps de nombreux impacts humains plus locaux, faire la part des conséquences des activités humaines sur l'état du lac par rapport aux effets climatiques, exige des séries encore plus longues. Peu de suivis sont aussi anciens et en l'absence de mesures directes, certains éléments indirects, chimiques ou biologiques, peuvent témoigner des conditions passées.

La paléolimnologie est la science qui étudie l'évolution passée des milieux aquatiques, en particulier des lacs. Sa méthode consiste à analyser les sédiments lacustres formés par l'accumulation progressive des particules qui décantent au fond du lac et qui enregistrent les conditions passées de l'environnement dans lequel ils se sont formés (voir question 1-02 : *Que nous raconte l'étude des sédiments d'un lac ?* et question 3-07 : *Que deviennent les micropolluants introduits dans les lacs ? Quels sont les risques associés ?*). Cette approche se base sur l'interprétation des informations archivées par les sédiments, telles que leur structure physique, leur composition chimique ou leur contenu en restes biologiques (débris animaux et végétaux, ADN). La reconstruction des chroniques nécessite une datation précise de ces couches.



Photo 2 – Carottage
sur le Léman
(© Laboratoire Edytem
– UMR 5204)

Les études paléolimnologiques du récent, focalisées sur les deux derniers siècles, ont montré que ces trois grands lacs, même s'ils ont été soumis au même climat, n'y répondaient pas avec la même amplitude ni avec les mêmes réponses.

Le réchauffement climatique n'exerce que des impacts faibles sur les communautés planctoniques du lac d'Annecy, qui semblent beaucoup plus dépendantes des conditions environnementales locales (limitation par le phosphore par exemple).

Au contraire, les communautés planctoniques du lac du Bourget et du Léman sont beaucoup plus sensibles au réchauffement de l'air de ces 40 dernières années. Des concentrations en phosphore plus élevées pourraient exercer sur les lacs un effet vulnérabilisant au changement climatique.

Stocker les données et les interpréter

Toutes les données issues de ces suivis sont, pour la plupart, conservées et stockées dans des bases de données informatiques, qui facilitent la recherche d'informations et l'analyse de jeux de données importants. C'est un des rôles principaux d'organisations scientifiques comme les observatoires environnementaux.

Dans le cas des lacs alpins, c'est l'Observatoire des Lacs alpins qui assure ce rôle, en partenariat avec les gestionnaires de ces milieux. Le traitement de ces quantités importantes de données fait appel à des méthodes mathématiques qui permettent de détecter les évolutions de l'écologie des lacs, de les comparer entre eux et de hiérarchiser l'importance des paramètres environnementaux et de leurs variations.

Au final, un tel outil permet donc d'établir des relations de cause à effet entre changement des facteurs de l'environnement et réponses écologiques des lacs.

On a pu ainsi identifier l'évolution des paramètres de forçage, qui expliquent l'évolution des lacs alpins :

- les changements de concentrations en phosphore (fig. 2) ou l'intensité de rempoissonnement, facteurs locaux liés à l'activité humaine sur le bassin versant ;
- les changements de température de l'eau ou d'hydrologie, facteurs globaux liés au changement climatique en cours.

L'importance relative de ces facteurs est cependant différente d'un lac à l'autre et l'évolution de chaque lac est spécifique.

Peut-on prévoir le futur ?

Au-delà de l'intérêt scientifique de compréhension et de reconstitution de la qualité passée des lacs, un des enjeux est bien la possibilité d'utiliser les données acquises pour essayer de prédire le futur des lacs pour les 50 ou 100 ans à venir (voir question 8-01 : *Quel avenir pour les lacs dans un demi-siècle ?*). L'extrapolation de ces connaissances pour imaginer l'évolution à venir des lacs est très délicate.

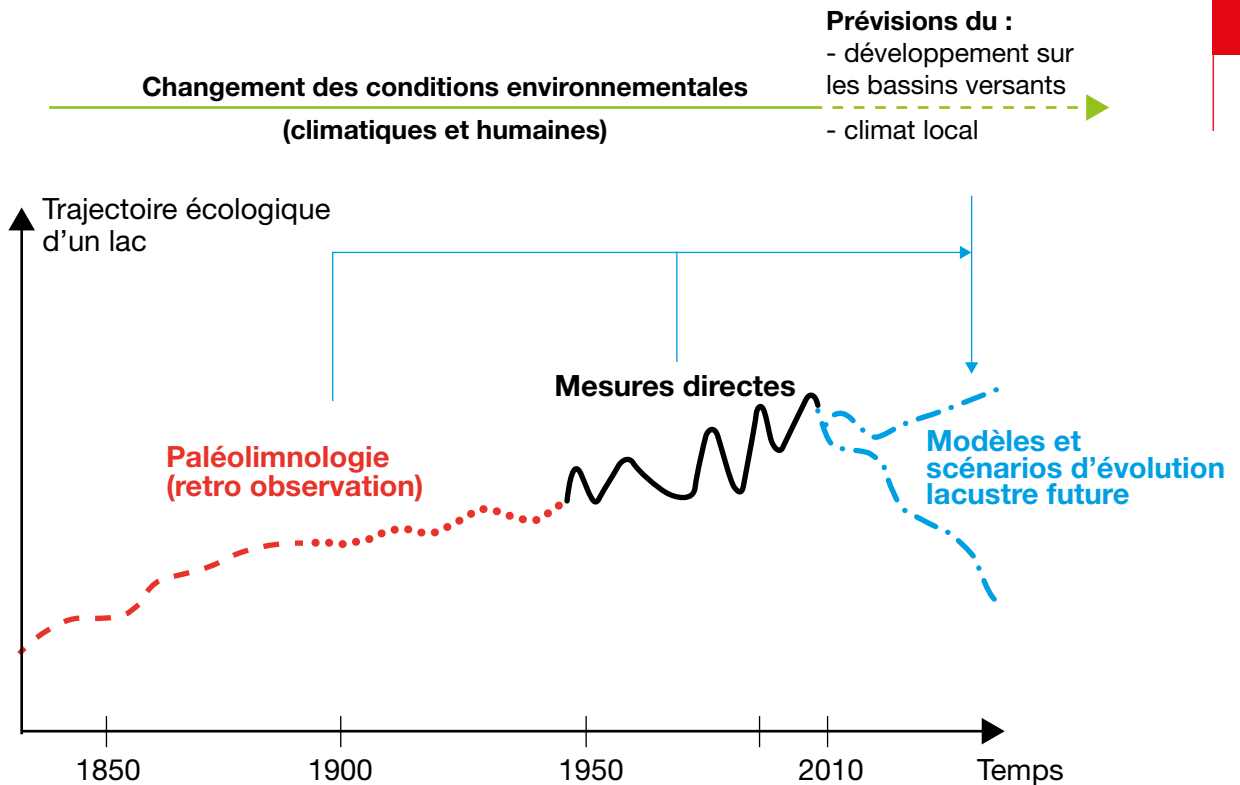


Fig. 3 – Organisation des suivis et des connaissances permettant de caractériser l'évolution des systèmes lacustres. D'après Meybeck et al. 2014

En effet, les paramètres sont multiples et relativement incertains : densité de population, climat, occupation des sols, espèces invasives. Ils sont autant de variables pour lesquelles l'incertitude qui leur est associée rend les prévisions assez hasardeuses.

Néanmoins, les connaissances acquises par l'observation sur le fonctionnement des systèmes lacustres, confrontées à des hypothèses d'évolution du développement humain (industries, zones urbanisées, tourisme...) et à l'évolution climatique sur le bassin versant de chaque lac, permettent a minima d'éclairer la prise de décisions et d'actions pour assurer une gestion durable des grands lacs (fig. 3).

Ce qu'il faut retenir

Chaque strate de sédiment a acquis une signature bio-géochimique unique lors de sa formation. Celle-ci renseigne sur les conditions passées et rend possible la reconstitution des trajectoires environnementales du lac et de son bassin versant sur le long terme. Ce regard vers le passé permet d'estimer l'ampleur des changements actuels et d'évaluer la véritable part d'implication des facteurs de forçages environnementaux : le climat, l'érosion des bassins versants, la teneur en nutriments.

Limnologie Science des eaux continentales et des organismes qui y vivent.

Les lacs sont-ils menacés par le changement climatique ?

► Thomas Pelte, Agence de l'Eau RMC • Christophe Chaix, Observatoire savoyard du Changement Climatique, MDP73 • Orlane Anneville et Stéphan Jacquet, INRA CARRETEL •

Toute évolution des paramètres climatiques sur le long terme (température de l'air, pluviométrie, insolation, humidité) perturbe le fonctionnement des systèmes naturels. Or il est maintenant indéniable que le climat change. Les membres du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) sont unanimes : l'atmosphère se réchauffe sous l'effet des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Ce qui diffère des évolutions naturelles passées, c'est sa rapidité et son ampleur.

Depuis le début du xx^e siècle, les températures moyennes sur les Alpes ont augmenté de 1,5 à 2 °C. Ce réchauffement, en forte progression depuis les années 1980, devrait continuer et s'accélérer après 2050.

Les futurs possibles décrits par les climatologues

Les informations apportées par la science sur le changement climatique futur sont issues de modélisations climatiques, paramétrées avec des niveaux de gaz à effet de serre sur des horizons temporels différents (2030, 2070). Ces projections renseignent sur l'évolution probable de certains paramètres climatiques comme la température moyenne de l'air, les précipitations, l'évaporation, le rayonnement. Ces projections globales sont régionalisées puis traduites en impact au niveau régional, sur l'environnement, les écosystèmes, et les activités humaines. Il ne s'agit donc pas de prévisions, mais plutôt de futurs possibles avec de multiples incertitudes qu'il faut naturellement prendre en compte.

Dans les Alpes, les modèles s'accordent sur une hausse des températures de l'air de 4 °C pour la fin du siècle. Les précipitations estivales baisseraient, les sols s'assècheraient, les débits des cours d'eau diminueraient de 20 à 50 % d'ici 2050 en période de basses eaux. La durée d'enneigement devrait également baisser fortement sous 2000 m, de -15 à -30 % d'ici 2030, jusqu'à -60 à -80 % vers la fin du siècle. Le pic de fonte de neige devrait reculer d'un à deux mois dans l'année, avec des conséquences fortes sur l'hydrologie des rivières et des lacs.

Les lacs se réchaufferaient aussi. Pour les lacs profonds, les températures des eaux proches de la surface augmenteraient plus qu'en profondeur, intensifiant le gradient de température dans la zone intermédiaire dite métalimnion* (voir question 1-04 : *Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette ?*). La stratification thermique* se mettrait en place plus tôt et se maintiendrait plus tard dans l'année. Enfin, l'augmentation des températures du fond laisse penser que les brassages complets seraient moins fréquents, avec des conséquences écologiques importantes. Ils pourraient néanmoins avoir lieu à des températures plus élevées en raison d'hivers plus cléments.

Les données historiques confirment le phénomène

Malgré les incertitudes qui accompagnent ces projections scientifiques, la menace pour les lacs alpins est réelle, d'autant que les effets du changement climatique commencent à se manifester dès à présent. Les tendances observées depuis 30 ou 50 ans confortent les résultats annoncés par les modèles climatiques. Au cours des

dernières décennies, la température de l'eau de surface des lacs a augmenté parallèlement aux températures de l'air. La période de stratification thermique s'est également étendue : en 30 ans, elle s'est avancée d'environ un mois sur l'année hydrologique du Léman et disparaît plus tard

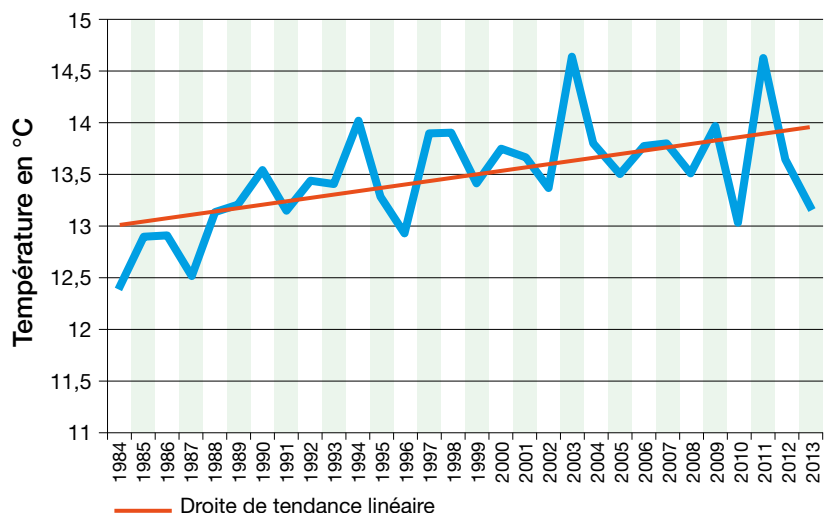


Fig. 1 – Températures moyennes annuelles en °C mesurées au centre du lac du Bourget à 2 m de profondeur entre 1984 et 2013. (source : base de données SOERE-INRA de Thonon-les-Bains, données CISALB-INRA, CALB, traitement OsCC MDP73)

dans l'année. L'évolution annoncée des températures de l'air pour les décennies à venir devrait intensifier ces phénomènes. C'est en tout cas ce que les modèles mathématiques laissent présager. Pour donner un ordre d'idée, si l'effet de serre continue d'augmenter à ce rythme, il est possible que l'augmentation annuelle des températures du fond du Léman jusqu'à 20 m de profondeur prenne 2 °C et près de 3 °C en surface. La période de stratification serait alors plus longue d'environ 3 semaines et les brassages complets seraient moins fréquents.

Les changements d'hydrologie sont également une menace réelle. Ainsi, pour le lac du Bourget, le temps de renouvellement des eaux par les rivières est passé de 7 à 10-11 ans en 30 ans (période 1980-2011), notamment du fait de la baisse des débits de la Leysse et du Sierroz.

Un écosystème vulnérable

La vie aquatique et la qualité écologique des lacs sont fortement contrôlées par la température de l'eau, la stratification thermique et les brassages hivernaux. Le mélange des eaux est très important car

il entraîne la réoxygénation des couches profondes à partir de la surface et la remise à disposition des nutriments qui avaient été minéralisés dans les couches inférieures. Dans des conditions où il y a suffisamment d'oxygène en profondeur, le phosphore reste au fond du lac et peut être piégé dans les sédiments. Ce phosphore peut à l'inverse être resolubilisé à partir des couches profondes si l'oxygénation y est insuffisante. Si l'évolution de l'hydrodynamique des lacs se confirme et que le réchauffement climatique réduit la fréquence et l'importance des brassages complets :

- les couches de surface pourraient ne plus être enrichies en nutriments à la fin de l'hiver, limitant le développement du phytoplancton au printemps;
- les couches profondes, enrichies en nutriments par la minéralisation, voire le relargage des sédiments, renfermeront un stock en attente pouvant être remis à disposition de façon occasionnelle et contribuant ainsi à une fertilisation accrue du lac.

Les changements de dynamique et/ou d'intensité de ces paramètres modifieraient alors l'abondance et la composition des communautés, algales ou piscicoles : certaines espèces seraient favorisées au détriment d'autres moins compétitives. S'il se poursuit, le réchauffement pourrait agir également de façon directe sur la reproduction et la survie embryonnaire des poissons inféodés aux eaux froides, tels que l'omble chevalier et le corégone. Chez l'omble chevalier, le refroidissement de la température de l'eau contrôle le déclenchement de la fraie. Les températures de l'eau doivent descendre en dessous de 7 °C pour que se produisent l'ovulation et la spermiation. De fait, si les lacs ne se refroidissent plus suffisamment en hiver, la reproduction naturelle de l'omble chevalier et du corégone serait impossible. En revanche, d'autres espèces comme le gardon pourraient être favorisées par le réchauffement climatique. À long terme, dans quelques décennies, l'évolution du peuplement piscicole pourrait donc redevenir comparable à celle observée il y a 25 ans, en phase d'eutrophisation dans le Léman et le lac du Bourget.

Métalimnion *Couche intermédiaire des eaux d'un lac.*

Stratification thermique *Répartition verticale de la température dans l'eau.*



Photo 1 – Baisse du lac du Bourget lors de la sécheresse de 1976 (© CISALB) ◀

Ce qu'il faut retenir

Le changement climatique est inéluctable, d'après les climatologues, mais la nature et l'ampleur de ses incidences restent incertaines. Néanmoins, les tendances évolutives déjà observées sur plusieurs décennies de surveillance confortent les preuves d'un réchauffement de l'eau et de modifications importantes de l'hydrodynamique des grands lacs alpins. Ce sont essentiellement les impacts attendus sur la stratification thermique et le brassage hivernal qui induiront une vulnérabilité marquée des écosystèmes lacustres et des changements écologiques.

Quels sont les effets du changement climatique sur les poissons de lac ?

► Christian Gillet et Alexis Champigneulle, INRA CARRTEL •

Le peuplement piscicole des grands lacs alpins français comprend à la fois des espèces inféodées aux eaux froides et profondes, appartenant à la famille des salmonidés (omble chevalier, corégone, truite) et des espèces vivantes, au moins pendant l'été, dans les eaux chaudes en surface : les cyprinidés (brème, carpe, gardon, chevesne, rotengle), et les percidés (perche, sandre), ainsi que le brochet. Le réchauffement climatique aura des effets très différents sur ces groupes d'espèces.

Les effets du changement climatique sur les salmonidés

Dans le cycle de vie des poissons, il existe 3 phases pendant lesquelles les individus sont très sensibles aux conditions thermiques : la période de fraie, le développement des œufs et les premiers mois de vie des larves ou des alevins.

L'augmentation de la température de l'eau peut jouer sur la reproduction des espèces

Le corégone, l'omble chevalier et la truite lacustre sont les trois espèces de salmonidés, présentes dans les lacs de la région. Ces poissons se reproduisent en hiver. Il est nécessaire que la température de l'eau s'abaisse en dessous d'une certaine valeur pour que la fraie puisse se dérouler dans de bonnes conditions.

Chez l'omble chevalier, ce seuil thermique se situe vers 7 °C. Les œufs de cette espèce se développent correctement entre 3 et 6 °C mais les mortalités embryonnaires augmentent rapidement lorsque la température dépasse 8 °C. L'alevin d'omble chevalier, au cours des premières semaines, a besoin d'une température comprise entre 6 et 8 °C. Au-dessus de 10 °C, sa croissance est ralentie et beaucoup d'individus ne s'alimentent pas.

Les exigences thermiques pour la reproduction du corégone et de la truite lacustre sont moins connues, mais ces poissons ont aussi besoin d'eau froide pendant leur reproduction.

Dans leur habitat naturel lacustre, les températures évoluent. Ainsi, celle du

La lutte contre l'eutrophisation a favorisé le développement des populations de salmonidés et a entraîné une diminution des populations des cyprinidés. Le réchauffement climatique pourrait avoir l'effet inverse.



Photo 1 – Perche (© B. Fournier)



Photo 2 – Rotengle
 (© Y. Gouguenheim – Image & Rivière)

Léman est actuellement proche de 6 °C en hiver. Si le réchauffement se poursuit, elle devrait dépasser 7 °C dans quelques décennies, ce qui pourrait perturber la reproduction de l'omble chevalier. Actuellement, le corégone fraie un peu plus tard qu'autrefois, mais les œufs se développent plus vite durant l'hiver en raison de températures plus élevées. Au printemps, le zooplancton se développe plus précocement, l'eau se réchauffe plus vite, ce qui est favorable à la croissance des alevins. Dans ces conditions, les populations de corégones, favorisées par ailleurs par la ré-oligotrophisation (appauvrissement d'un milieu en éléments nutritifs), sont en augmentation dans plusieurs lacs alpins dont le Léman et le lac du Bourget.

Le réchauffement climatique peut modifier les habitats

Il peut entraîner une diminution de l'importance du brassage hivernal des eaux profondes, ce qui diminuerait leur réoxygénation. Elles constitueraient alors un habitat moins favorable pour les salmonidés, en particulier pour l'omble chevalier.

Le réchauffement climatique peut aussi favoriser le développement de maladies bactériennes ou parasitaires qui entraînent des mortalités chez les salmonidés. Ces affections progressent proportionnellement à l'augmentation des températures de l'eau. L'omble chevalier est ainsi soumis à une maladie bactérienne : la furunculose *Aeromonas salmonicida*, qui peut survenir lorsque la température dépasse 6 °C. Elle provoque des mortalités importantes lorsque l'eau dépasse 10 °C. La truite fario peut, elle, être sujette à une maladie parasitaire, la PLK (Proliférative Kidney Disease), qui attaque ses reins. Elle provoque des mortalités chez la truite lorsque l'eau dépasse 15 °C pendant plusieurs semaines en été.

Les effets du changement climatique sur les espèces à reproduction printanière

Ces espèces se reproduisent lorsque l'eau se réchauffe. Plus le réchauffement est rapide, plus la fraie de certaines espèces est précoce. Dans le Léman, entre 1980 et 2000, la fraie du gardon a été avancée de 2 semaines, en réponse à une élévation des températures de surface de 2 °C au mois de mai. Dans le même temps, la perche, qui se reproduit aussi en mai, n'a avancé sa date de fraie que de quelques jours. Il semble que les différentes espèces ne réagissent pas toutes avec la même intensité au changement climatique.

La température de l'eau des lacs alpins est généralement en dessous de l'optimum de croissance pour les espèces vivant en eau chaude pendant l'été. Le réchauffement devrait stimuler leur croissance si, parallèlement, elles disposent d'un stock de nourriture suffisant.

Ce qu'il faut retenir

Le réchauffement climatique aurait tendance à favoriser le développement des espèces qui se reproduisent au printemps et qui vivent en eau chaude en été. Il représente une menace pour celles qui se reproduisent en hiver et qui ont besoin pour cela d'une eau inférieure à 10 °C. Le réchauffement semble améliorer la survie des larves et des alevins, ainsi que la croissance des juvéniles et des adultes si la nourriture disponible est suffisante.

Le niveau des lacs peut-il un jour baisser par manque d'eau ?

► Agnès Barillier, EDF •

Cette question peut sembler saugrenue, mais s'avère intéressante quand on la replace dans un contexte de changement climatique et d'augmentation de la demande pour différents usages de l'eau.

De quoi résulte le niveau des grands lacs alpins ?

Les niveaux des lacs résultent d'une régulation établie par des règles pour concilier les différents usages de l'eau, parfois antagonistes.

Dans le passé, les niveaux pouvaient varier naturellement assez fortement : jusqu'à 2 m pour le Léman et 3,5 m pour le lac du Bourget. Ces variations naturelles étaient liées à l'évolution saisonnière des régimes hydrologiques du bassin versant et, de manière directe, à celle du climat.

La régularisation de ces niveaux est intervenue :

- pour protéger les riverains du lac ou de leurs émissaires, contre les inondations, pour le Léman, les lacs du Bourget et d'Annecy, ce qui s'est traduit par une diminution de l'amplitude des marnages* ;
- pour développer un nouvel usage, comme l'hydroélectricité sur le lac d'Aiguebelette. Cela a induit le maintien d'un marnage saisonnier de 60 cm, dans la limite maximale annuelle de 2,15 m.

Le lac d'Annecy est ainsi contrôlé depuis 1874 par des vannes situées sur les canaux formant son exutoire. Sa cote habituelle varie dans la limite d'une dizaine de cm maximum autour d'un niveau de référence. Sans régulation, cette variation serait naturellement d'une cinquantaine de cm. Le remplacement des vannes sur le Thiou en 1965 a fortement réduit le marnage.

Le Léman est régularisé à Genève depuis 1884 par le barrage du pont de la Machine, remplacé en 1995 par le barrage du Seujet. Les niveaux régularisés maintiennent un marnage saisonnier de 70 cm ; les années bissextiles, la cote hivernale est abaissée de 15 cm supplémentaires pour permettre des travaux d'entretien sur les ouvrages.

Le lac du Bourget est régulé sur 30 cm depuis 1982 par l'aménagement hydroélectrique du Haut-Rhône (photo 1). Si un des paramètres naturels (précipitations, évaporation nette, apports du bassin versant) du bilan hydrique évolue, sans modification des consignes de régulation, alors les niveaux des lacs pourraient changer (voir question 6-05 : *Comment et pourquoi le niveau des lacs est-il régulé ?*).



Photo 1 – Écluse du barrage de Savières (© CISALB)

Des exemples récents de baisse de niveau des lacs

La baisse générale de l'hydrologie du bassin versant du lac d'Annecy (photo 2), environ -7 % sur la dernière décennie, associée à des épisodes caniculaires estivaux accentuant l'évaporation, a provoqué deux épisodes exceptionnels de baisse du niveau pendant l'été 2003 (- 49 cm) et au cours de l'automne 2009 (- 38 cm), la régulation ne pouvant compenser le manque d'apports des affluents du lac.

Avec les prévisions d'évolution du climat dans les prochaines décennies, ces épisodes de réduction des apports hydriques et d'augmentation de l'évaporation pourront se multiplier, tout comme pourront s'accroître les prélèvements en eau pour les usages (eau potable sur le Léman et le lac d'Annecy ou production hydroélectrique sur le Rhône).

Si les besoins des rivières et des usages à l'aval des lacs nécessitent le respect d'un Débit d'Objectif d'Étiage (DOE) permettant de garantir durant l'étiage* un bon état écologique de ces milieux, ainsi que l'alimentation en eau potable et les différents usages, alors les niveaux des lacs pourraient être amenés à baisser en période estivale. Ceci pourrait perturber certains usages du lac, comme la navigation ou la baignade (une baisse des niveaux découvre des fonds moins esthétiques). Pour le Léman, cependant, on pourra sans doute, même dans des hypothèses drastiques, assurer à la fois le niveau du lac et le DOE, en adaptant la gestion hebdomadaire et en limitant la rétention des barrages amont.

Ces épisodes resteront saisonniers, l'augmentation des apports hydriques lors des crues d'automne ou au printemps permettant de remonter la cote des lacs. Ils nécessiteront cependant des adaptations des règles de conciliation des usages et des aménagements touristiques.



Photo 2 – Rive du lac d'Annecy mise à nue en octobre 2009 (© D. Zanella – SILA) ◀

Ce qu'il faut retenir

Le changement climatique entraîne une réduction des apports hydriques des bassins versants et l'augmentation de l'évaporation nette. En parallèle, on constate une augmentation des prélèvements d'eau, pour l'eau potable ou la production hydroélectrique. Ces phénomènes impliqueront dans les prochaines décennies une accentuation du marnage des lacs à l'échelle annuelle, avec un abaissement des cotes estivales de l'ordre de quelques cm à une dizaine de cm par rapport aux niveaux actuels.

Marnage Écart entre les hautes eaux (période de crue) et les basses eaux (étiage).

Étiage Période de l'année où le niveau d'un lac atteint son point le plus bas.

L'évolution de l'occupation des bassins versants peut-elle changer l'état des lacs ?

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

L'évolution du mode d'occupation des sols des bassins versants des grands lacs semble inexorable du fait de la croissance de la population. Cette dynamique aura-t-elle un impact sur la qualité des eaux produites par les bassins versants et sur l'état des lacs qui les reçoivent ? Une telle question suppose de s'interroger sur la relation entre mode d'occupation des sols et qualité des eaux.

Mode d'occupation des sols (MOS)

Le MOS représente la couverture biophysique d'un territoire géographique. En fonction des objets qui couvrent le sol, on distingue l'espace habité (MOS urbain, périurbain, rural), l'espace naturel (MOS forêt, marais...) et agricole (MOS prairies, cultures...). Le MOS est un indicateur global des interactions entre activités humaines et eaux, dans un contexte climatique donné.

- Les MOS urbains sont toujours associés à des systèmes techniques d'utilisation et d'évacuation de l'eau (eau potable, assainissement, eaux pluviales), systèmes dont les performances sont cruciales pour la qualité de l'environnement.
- Les MOS agricoles sont associés à un cycle plus naturel de l'eau, dont certaines composantes, et notamment les conditions d'écoulement, sont partiellement contrôlées par le type d'agriculture et les pratiques associées (drainages, aménagements, travail du sol...).

Lors de son transit dans un bassin versant, l'eau acquiert une charge sédimentaire, chimique et polluante, qui conditionne l'impact du bassin sur son lac.

Cette charge varie selon les modalités de lessivage et d'érosion des sols, la nature des apports sur ceux-ci, les

rejets d'eaux usées, soit selon un ensemble de caractéristiques reliées aux MOS. Le MOS est donc une expression assez synthétique des impacts potentiels d'un territoire sur l'eau.



Photo 1 – Le lac d'Annecy (© Office de tourisme d'Annecy)

Un coup d'œil rétrospectif

Sur les 50 dernières années, plusieurs vagues de pollutions affectant les grands lacs et associées à des évolutions du MOS de leurs bassins versants, se sont succédé. Les mesures correctives ont porté surtout sur les pollutions dues aux villes et aux industries : les rejets, puis les impacts ont été fortement réduits grâce à la mise en place de systèmes de collecte et de traitement performants des eaux usées (voir question 3-04 : *Quelle est la pression de l'urbanisation sur la qualité de l'eau des lacs ?*).

Du fait de l'inertie sociétale face aux problèmes posés et de la lenteur de réponse de l'écosystème lacustre, la dépollution des lacs s'est avérée longue et difficile. Ceci rappelle à quel point il est important de convaincre et de prendre des mesures correctives avant que les perturbations ne soient trop avancées (voir question 7-01 : *Quels ont été les actes fondateurs de la protection des lacs ?*).

L'extension inéluctable de l'urbanisation

Les lacs stimulent le développement local (photo 1), engendrant une extension des MOS urbains à leur périphérie, au détriment des MOS agricoles.

Les impacts de ce processus d'urbanisation peuvent être maîtrisés par :

- une modernisation permanente de la collecte et du traitement des eaux usées ;
- la mise en place de traitements des eaux rejetées par temps de pluie ;
- des actions de réduction à la source des rejets de polluants, y compris pendant la phase très perturbante des chantiers de construction.

Il s'agit en fait d'imposer des exigences de haute qualité environnementale dans le développement urbain, en relation avec la sensibilité exceptionnelle des lacs.

Le mitage de l'espace rural, un changement multirisque sous-estimé

Le mitage (morcellement) de l'espace rural accompagne le développement urbain. Il rajoute sur tout le territoire de nombreux rejets d'eaux usées, petits mais très dispersés et donc difficiles à contrôler. Il provoque aussi des modifications globales de l'utilisation agricole des sols et de l'hydrologie des bassins versants, effets indirects bien connus et qui entraînent :

- une baisse des capacités tampons hydrologiques du réseau hydrographique, avec pour conséquence une concentration des eaux de ruissellement, qui favorise l'érosion des terres agricoles et l'augmentation des flux estivaux de nutriments ;
- un accroissement des pollutions diffuses agricoles, du fait d'une tendance à la spécialisation des parcelles et à une concentration spatiale de certaines pratiques (photo 2).



Photo 2 – Champs de colza et grandes cultures dans la plaine de l'Orbe (© J.-M. Zellweger)

Au-delà de certains seuils, le mitage de l'espace rural crée donc un ensemble de risques difficilement acceptables à terme dans des bassins versants de grands lacs. L'objectif devrait être, et c'est un objectif clé pour la qualité à venir des lacs, à la fois de maîtriser le mitage lui-même (densifier l'habitat) et de pallier ses effets négatifs sur l'hydrologie et les sources diffuses agricoles.

Les évolutions du MOS : vers une haute qualité environnementale ?

Les évolutions du MOS vont bien au-delà d'un changement de décor paysager. Elles matérialisent une intensification des activités, une multiplication des sources de pollution, des types de produits utilisés et mis en contact avec l'eau, enfin un remaniement du régime des crues. Les évolutions du MOS sont en conséquence à l'origine de nouveaux risques. Il existe notamment de forts risques d'accroissement des charges de pollutions diffuses.

Vu l'inertie du système, la prévention est une urgence ! Elle passe, à l'échelle locale, par la mise en place de politiques promouvant un développement urbain et rural de haute qualité environnementale, action à renforcer, à l'échelle nationale, par plus d'encadrement des produits domestiques et chimiques mis sur le marché.

Ce qu'il faut retenir

Les changements de MOS en cours dans les bassins versants sont susceptibles d'impacter les grands lacs. Pour minorer et prévenir ces impacts, il convient d'inciter à des changements de pratiques pour réduire à la source les polluants, de continuer sans cesse à moderniser les systèmes d'assainissement, de s'attaquer aux pollutions diffuses urbaines et agricoles en créant des procédures de qualité relatives aux évolutions des modes d'occupation des sols.

