



Le lac du Bourget, depuis la Chambotte © M. Bouron

# Naissance et transformation

# Naissance et transformation des lacs : du temps des mammouths à nos jours

► Jean-Luc Loizeau, Université de Genève, Institut Forel • Anne Guyomard, SIAC GéoPark Chablais • Danielle Decrouez, Contamine-sur-Arve • Gérard Nicoud, Université Savoie-Mont-Blanc, EDYTEM •

**Au regard des temps géologiques, les lacs sont pour la plupart éphémères et disparaissent en quelques milliers ou dizaines de milliers d'années, remplis par l'accumulation de sédiments. La formation des grands lacs alpins est essentiellement l'héritage des nombreuses périodes glaciaires qui ont touché les Alpes depuis le début du quaternaire, il y a environ 2,6 millions d'années. L'évolution des formes lacustres que l'on connaît actuellement résulte essentiellement de la dernière glaciation, celle dite du Würm (il y a entre -110000 et -14000 ans) et de la période post-glaciaire.**

## Les lacs ont des origines variées

Ils peuvent être dus :

- à la tectonique des plaques (lac Baïkal en Sibérie);
- à l'activité volcanique (lac Pavin dans le Massif Central);
- aux écroulements rocheux et aux coulées de boue barrant une vallée (lac des Brenets dans le Jura);
- à l'abrasion des roches par la glace et les eaux s'écoulant à la base du glacier (la majorité des lacs alpins ou des grands lacs nord-américains);
- à la dissolution des roches par des eaux légèrement acides (ancien lac de la Girotte dans le Beaufortain);
- à l'activité des rivières, à un creusement éolien ou à des courants côtiers.

**Les grands lacs alpins ont comme origine l'érosion par les glaciers qui descendaient des Alpes et qui atteignaient plusieurs centaines de mètres d'épaisseur (1 200 m au niveau de Genève pour le glacier du Rhône).**

## Les lacs alpins peuvent avoir une histoire géologique différente

### Le Léman

La première trace d'un bassin lacustre dans la région lémanique remonte à près de 800000 ans à l'altitude de 800 m. Après le maximum de la dernière glaciation du Würm, il y a environ 35000 ans, le front du glacier du Rhône

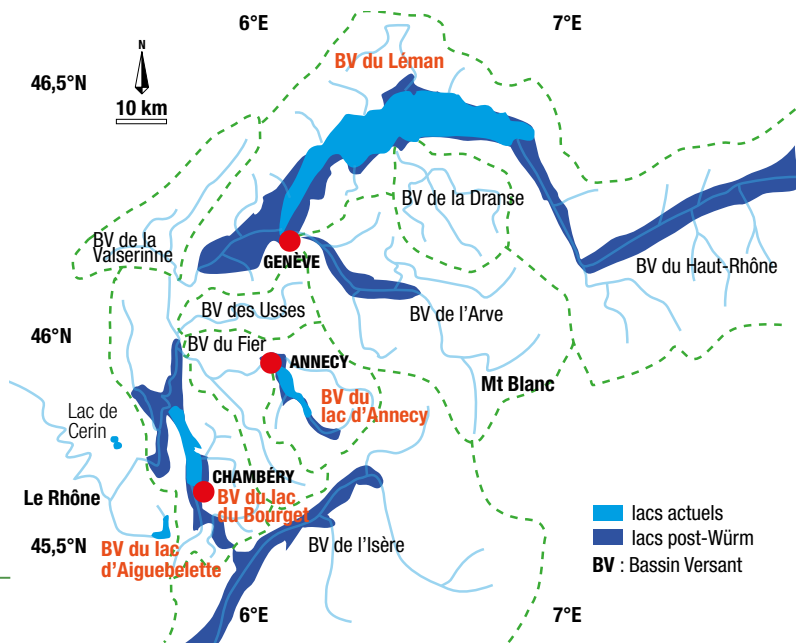


Fig. 1 – Les lacs avec leur extension maximale et leur extension actuelle (source : E. Chapron, 1999)

s'est retiré à 5 km en aval de Genève. L'hypothèse d'un lac, à l'altitude de 470 m, au niveau de Fort-l'Écluse est avancée. Après un recul à l'amont d'Évian-les-Bains, le glacier est revenu à Genève dans un lac existant à l'altitude de 410 m. Quand le glacier se retire définitivement dans le Valais il y a 18000 ans, l'extrémité orientale du Léman est au niveau du verrou de Saint-Maurice, à une altitude de 405 m (372 m aujourd'hui). L'abaissement de l'altitude de l'exutoire\*

par érosion et le comblement progressif avec les apports de matériaux par les cours d'eau (dont le Rhône) réduisent la surface du lac jusqu'à sa forme actuelle (photo 1).



Photo 1 – Le Léman, vue aérienne depuis la Dôle (© J.-M. Zellweger)

### Le lac du Bourget

Il subsiste des traces d'un lac hérité de la glaciation du Riss. À la fonte des glaciers de l'Isère, il y a environ 25000 ans, un lac s'est formé à une altitude de 280 m, soit 50 m au-dessus du niveau actuel, formant une étendue d'eau de plus de 200 km<sup>2</sup> entre Seyssel et Chambéry-Challes-les-Eaux. Ce lac s'est partiellement comblé, avec des dépôts essentiellement glaciaires, puis avec les alluvions de la Leysse et de l'Hyères au sud, du Sierroz et du Tillet à l'est, du Séran, du Fier et surtout du Rhône vers le nord. Après ce comblement, qui s'est arrêté il y a 13000 ans, des plaines alluviales et des tourbières se sont développées au nord (de Chautagne et de Lavours) et au sud (marais de la Motte-Servolex) et le Rhône s'est détourné vers l'ouest. Le lac actuel d'une longueur de 18 km se trouve à 232 m d'altitude.

### Le lac d'Annecy

L'existence d'un lac plus étendu que l'actuel, entre Cran-Gevrier et Lovagny, à une altitude ayant varié de 510 à 440 m, est attestée de la fin de la période glaciaire du Riss jusqu'au début du Würm, il y a environ 65000 ans.

À la fin de la dernière glaciation du Würm, la fonte rapide du puissant flux de glace issu

du massif du Mont-Blanc (glacier de l'Arve s'écoulant par le val d'Arly), du Beaufortain (glacier du Beaufortain) et d'une partie de la Tarentaise (glacier de l'Isère) a engendré de nouveau un lac, estimé à 63 km<sup>2</sup> (la surface du lac représente aujourd'hui 27 km<sup>2</sup>) à l'altitude de 460 m (446 m aujourd'hui). Le lac d'Annecy s'étendait vers le sud jusqu'au niveau de Saint-Ferréol, était plus large à la hauteur de Saint-Jorioz et s'avancé jusqu'à Chaumont et au nord de l'actuel cours du Fier. À cette époque, ce cours d'eau se jetait dans le lac et formait un delta, à l'emplacement actuel de la ville d'Annecy. Le Fier a abandonné le lac définitivement il y a environ 8000 ans, probablement à cause de l'activité de la faille du Vuache\* (photo 2).

### Le lac d'Aiguebelette

Il résulte de l'érosion de la molasse (sable cimenté par du calcaire argileux) par le glacier würmien de l'Isère débordant par-dessus la montagne de l'Épine. Le lac s'étendait plus au nord qu'actuellement.

**Exutoire** Cours d'eau évacuant les eaux d'un lac.

**Faille du Vuache** Cassure qui va de Fort-l'Écluse au lac d'Annecy.

## Ce qu'il faut retenir

**Les lacs alpins, résultats de l'érosion des roches par les glaciers ont généralement une durée de vie de quelques dizaines de milliers d'années. À l'époque des mammoths, ils étaient nettement plus grands qu'aujourd'hui (fig. 1) et beaucoup ont déjà disparu.**

# Que nous raconte l'étude des sédiments d'un lac ?

► Jean-Philippe Jenny, Université Savoie-Mont-Blanc, EDYTEM • Jean-Luc Loizeau, Université de Genève, Institut Forel •

**L'analyse des longues séries de données (plus de 50 ans) peut expliquer les trajectoires d'évolution des systèmes lacustres et définir certaines conditions environnementales passées. Les archives sédimentaires permettent de reconstituer l'histoire des lacs sur le long terme (de 100 à 10000 ans).**

## Qu'est-ce qu'une archive sédimentaire ?

Les sédiments lacustres sont formés de l'accumulation et de la transformation de particules issues du bassin versant\* (particules liées à l'érosion) ou produites dans la colonne d'eau\* (particules de matière organique, dites autochtones). Le lac du Bourget a ainsi accumulé plus de 200 m de sédiments depuis le dernier retrait glaciaire et livre une histoire longue d'au moins 10000 ans : c'est ce que l'on appelle une « archive sédimentaire ». Les sédiments lacustres sont exceptionnels car, dans certaines conditions (grande profondeur d'eau, stabilité des sédiments...), ils peuvent constituer une archive continue.

Grâce à la proximité des sources sédimentaires (bassin versant), les archives lacustres présentent des taux de sédimentation élevés (1000 fois plus qu'en milieu marin !) permettant des reconstitutions précises. Les varves, strates de sédiments déposées à un rythme annuel, constituent un bel exemple de ce type d'archive (fig. 1) et sont présentes dans les lacs du Bourget, d'Annecy et du Léman.

## Quelles informations peut-on extraire de ces sédiments ?

- **Les sédiments** enregistrent à la fois l'évolution du bassin versant et le fonctionnement du lac lui-même.
- **L'étude des fossiles**, des pigments d'algues ou l'analyse d'ADN, permet de déterminer les espèces passées et de reconstituer leurs assemblages, qui renseignent sur les conditions écologiques antérieures du lac.
- **L'analyse des matériaux** provenant du bassin versant permet de reconstituer l'évolution du paysage végétal autour du lac par l'étude des pollens, du régime des crues ou celui des apports de contaminants.

Ainsi, nous savons que les lacs du Bourget, d'Annecy et le Léman, ont connu de fortes modifications depuis environ deux siècles (avec une accélération depuis 50 ans), de leurs propriétés physico-chimiques et écologiques.

Ces perturbations résultent principalement de l'activité humaine : aménagement des cours d'eau et du paysage, rejets de nutriments (eutrophisation\*) et autres pollutions (cas du mercure dans certains sédiments du Léman), introduction de poissons, réchauffement climatique (voir question 8-03 : *Les lacs sont-ils menacés par le changement climatique ?* ; question 8-06 : *L'évolution de l'occupation des bassins versants peut-elle changer l'état des lacs ?*).

Les analyses des sédiments révèlent une augmentation progressive depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle de la production de matière organique liée à la prolifération d'algues. Les fossiles indiquent des changements progressifs dans les assemblages d'espèces planctoniques (diatomées, cladocères). La géochimie des archives indique que, depuis 60 ans, le fond des lacs s'est appauvri en oxygène. Ce changement a ainsi conduit à la disparition partielle des larves de chironomes (cousin du moustique) des sédiments. Les espèces de la zone pélagique (zone littorale) indiquent une meilleure qualité du milieu.

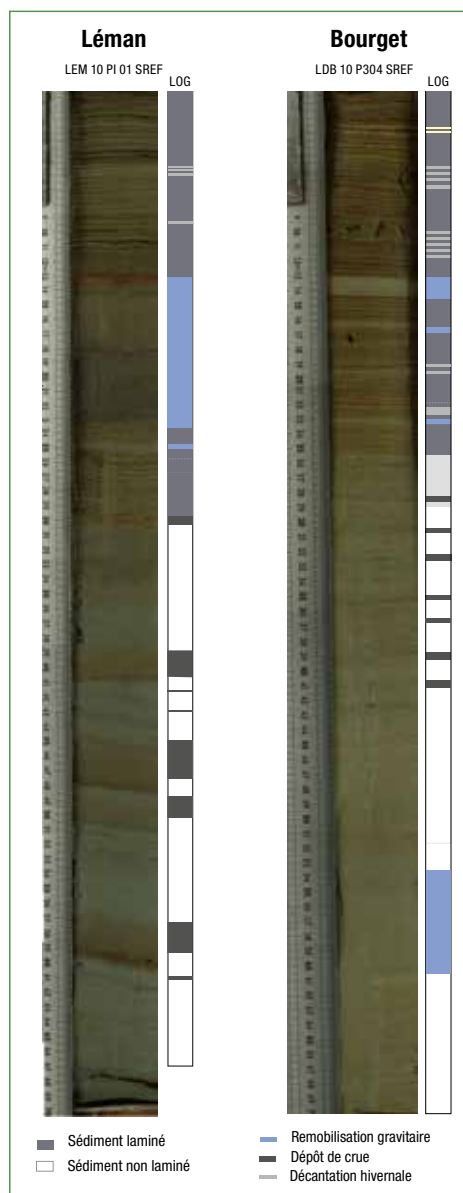
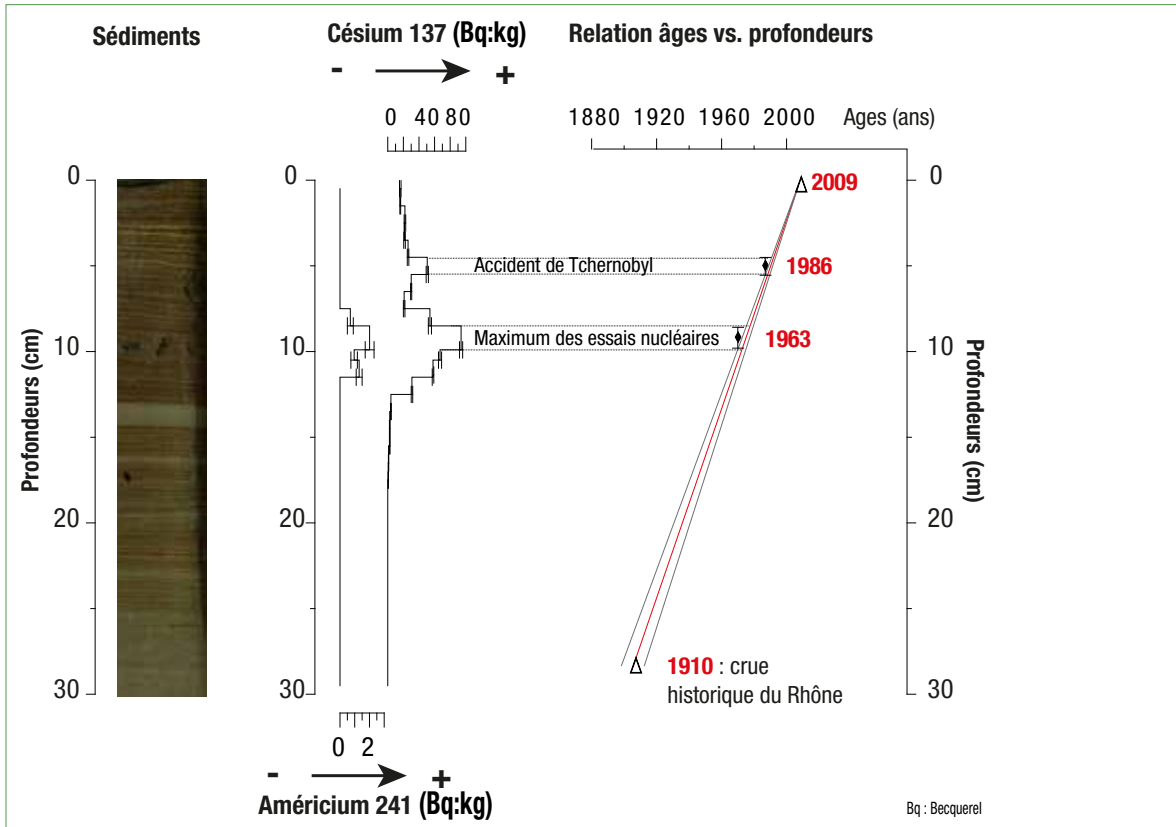


Fig. 1 – Coupe de deux carottes sédimentaires, l'une prélevée dans le lac du Bourget, l'autre dans le Léman. Ces carottes présentent des varves au sommet (source : J.-P. Jenny)



### Comment dater les sédiments ?

Pour avoir des observations exploitables, les sédiments lacustres doivent être datés. Deux méthodes sont utilisées : la détermination de l'âge des sédiments par mesure de la décroissance d'activité d'éléments radioactifs et l'identification dans le sédiment d'un événement dont on connaît l'origine et la date. La mesure d'éléments radioactifs reste la plus utilisée, avec le carbone 14 comme élément le plus connu.

D'autres éléments naturels comme le plomb 210 permettent de dater les sédiments déposés au cours du dernier siècle (fig. 2). D'autres marqueurs sont également utilisés, comme l'apparition de pollen de marronnier dans la région du lac du Bourget (vers 1850) ou les cendres volcaniques provenant de l'éruption il y a 11 000 ans du Laachersee (Allemagne) et retrouvées dans les sédiments du Léman.

**Bassin versant** Ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents, délimité par une ligne de relief ou de partage des eaux.

**Colonne d'eau** Représentation verticale du volume d'eau, compris entre les interfaces eau/sédiments et eau/atmosphère.

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

Fig. 2 – Modèle âge/profondeur des sédiments du lac du Bourget déterminé à partir des radioéléments du plomb-210, de l'américium-241 et du césium-137. Les pics de concentration caractéristiques sont observables pour le maximum des retombées des essais nucléaires dans l'atmosphère en 1963 et pour l'accident de Tchernobyl en 1986. Le sommet des sédiments est daté à l'année 2009, date de prélèvement de la carotte (source : J.-P. Jenny)

### Ce qu'il faut retenir

Chaque strate de sédiment a acquis une signature biogéochimique 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.

# Combien de temps faut-il pour renouveler les eaux d'un lac ?

► Jean-Luc Loizeau, Université de Genève, Institut Forel • Bernard Montuelle, INRA CARTEL •

**Les lacs sont des lieux de stockage de l'eau et en particulier des eaux issues de leur bassin versant. Le climat, la surface, la nature du bassin versant, mais aussi le volume de la cuvette lacustre déterminent le temps de résidence de l'eau dans cette cuvette.**

## Comment calculer le temps de séjour théorique ?

Le temps nécessaire au renouvellement des eaux d'un lac dépend de plusieurs paramètres : le volume d'eau stocké dans la cuvette lacustre, les apports hydriques entrants (affluents, pluies...) et les flux d'eau sortants du système (niveau de l'exutoire qui détermine le volume, évaporation, captage d'eau...) (fig. 1 et 2).

Le temps de séjour théorique moyen de l'eau dans le bassin  $T_s$  (ou temps de résidence, temps de renouvellement) est le temps nécessaire au renouvellement complet des eaux d'un lac. On l'obtient en faisant le rapport entre le volume du lac ( $V$  en  $m^3$ ) et le débit moyen annuel entrant incluant tous les apports ( $D$  en  $m^3/s$ ), soit la formule  $T_s = V/D$  (Temps de séjour = Volume/Débit).

Le volume du lac est déterminé à partir de la carte bathymétrique du bassin, à savoir la mesure des profondeurs et du relief lacustre.

Pour calculer le débit moyen annuel entrant, tous les apports hydriques doivent être pris en compte, incluant l'ensemble des rivières, les pluies directes sur le lac, les sources sous-lacustres et le ruissellement. Ainsi les eaux d'un grand bassin avec proportionnellement peu d'apports auront un temps de séjour très long, jusqu'à plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'années (350 ans pour le lac Baïkal). À l'inverse, de petits plans d'eau très irrigués auront des temps de séjour très courts, de l'ordre de quelques jours à quelques semaines (36 semaines pour le lac de Nantua). Pour simplifier, on peut illustrer ce concept en imaginant le temps qu'il faudrait pour remplir à ras bord une baignoire initialement vide (photo 1).

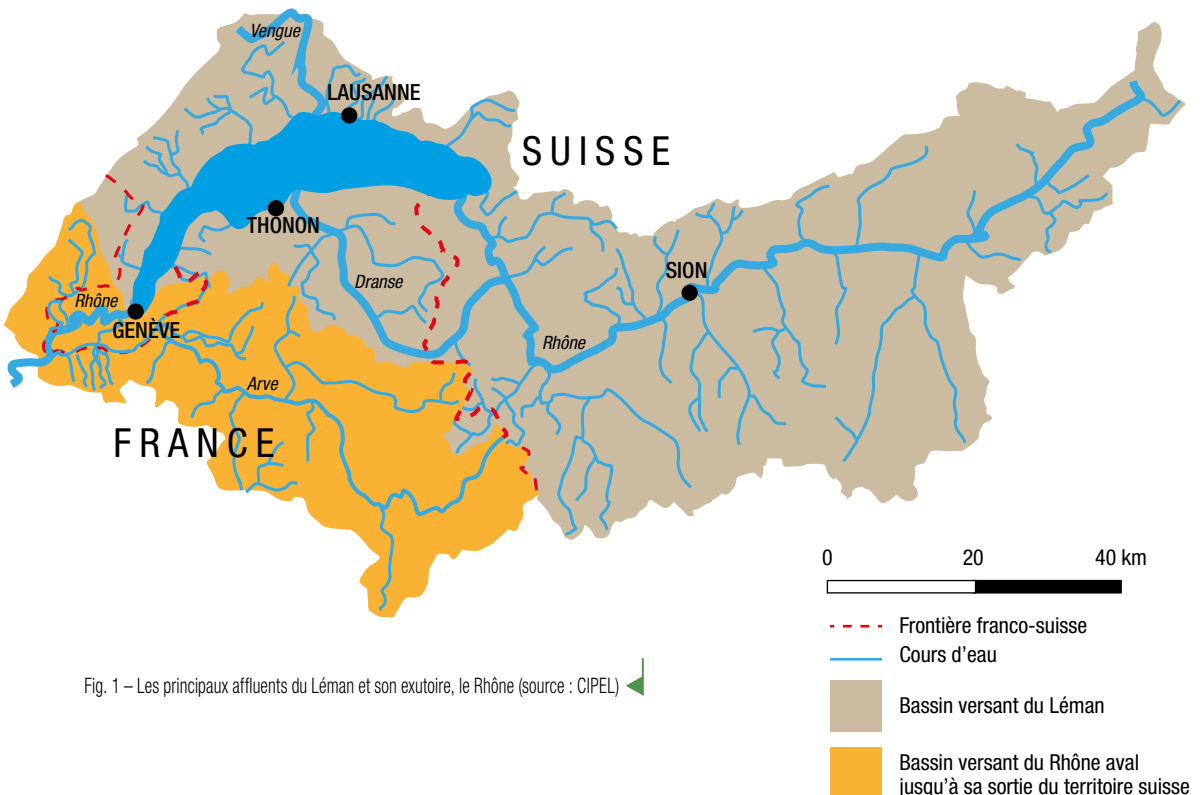


Fig. 1 – Les principaux affluents du Léman et son exutoire, le Rhône (source : CIPTEL) ◀

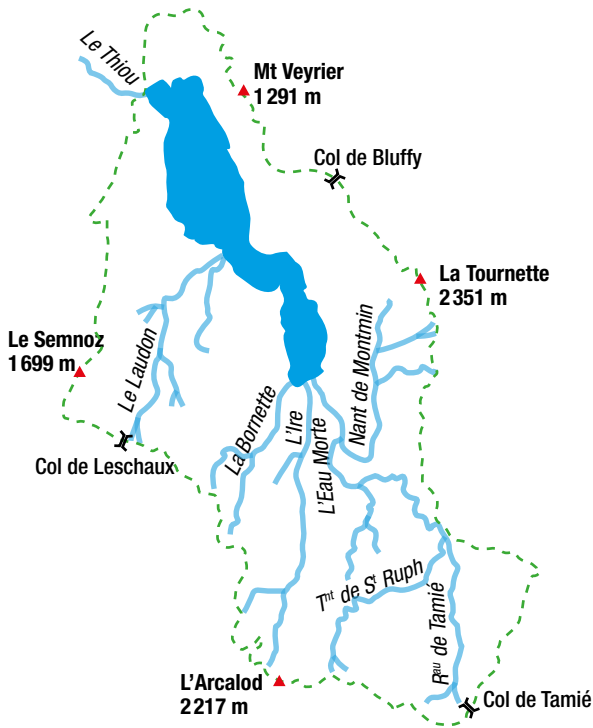


Fig. 2 – Les principaux affluents du lac d'Annecy (source : SILA)

### Une valeur théorique... et en réalité ?

Le temps de séjour théorique de l'eau est, dans le Léman de 11,3 ans (environ 75 % des eaux du Léman proviennent du Rhône), dans le lac d'Annecy de 3,8 ans, dans le lac du Bourget de 9 ans et de 3,1 ans pour le lac d'Aiguebelette. Toutefois, ces valeurs sont théoriques, car les lacs ne sont pas des masses d'eau uniformes mélangées de manière homogène tout au long de l'année.

Le temps pendant lequel une molécule d'eau va rester dans le lac dépend du lieu de son introduction : à la surface avec la pluie, plus en profondeur par insertion des eaux provenant des rivières, ou proche du fond par les apports des sources.

Dans le Léman, par exemple, les masses d'eau se structurent en trois couches dont les temps de séjour moyens varient entre 2 ans (0-50 m), 10 ans (50-250 m) et 20 ans (250-309 m). Ces temps de séjour peuvent changer en fonction du brassage hivernal total ou partiel (voir question 1-04 : *Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette ?*).

### Quelle importance a le temps de résidence pour le fonctionnement du lac ?

Le temps de séjour est une donnée fondamentale à connaître pour comprendre le fonctionnement physique, chimique et biologique d'un lac. Il conditionne la circulation des nutriments et des polluants dans les lacs et l'inertie du système (sa capacité à réagir plus ou moins rapidement à un événement externe).

Un lac présentant un court temps de résidence verra son bassin rapidement contaminé par une pollution externe, mais sera également rapidement nettoyé. Inversement, un lac ayant un long temps de séjour sera plus lentement affecté, mais mettra plus de temps pour retrouver une situation saine.



© GRAIE

Photo 1 – Illustration du temps de séjour de l'eau dans un réservoir.

Soit une baignoire de 200 litres de volume et un robinet dont le débit est de 10 litres/minute. Le temps de séjour est-il de : 15 minutes ? 20 minutes ? 25 minutes ?

Réponse à la question :  $200 \text{ l} / 10 \text{ l min}^{-1} = 20 \text{ minutes}$ . Si le robinet coule plus longtemps, c'est l'inondation assurée s'il n'y a pas de trop plein.

### Ce qu'il faut retenir

**Le temps de séjour des eaux dans les lacs dépend pour l'essentiel de son volume et des flux hydriques entrants. Ce temps, différent selon les lacs et pouvant varier au sein des différentes couches d'eau d'un même lac, est un des déterminants de la qualité chimique et de l'écologie des systèmes lacustres.**

# Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette ?

► Bernard Montuelle, INRA CARRTEL • Audrey Klein, CIPEL •

**Les lacs sont souvent considérés comme des étendues d'eau calmes, par opposition aux cours d'eau. Dans les faits, tempêtes et apports d'eau par les affluents sont parfois forts et entraînent turbulences et mélanges de masses d'eau. Un autre moteur de ces brassages est la différence de température qui existe entre les couches d'eau d'un lac.**

## Un peu de physique

La densité de l'eau varie en fonction de sa température : c'est à 3,98 °C très précisément que l'eau est la plus dense (quasiment 1 000 g/l, pour de l'eau douce, au niveau de la mer). Au-dessus de cette température, la densité de l'eau diminue (997 g/l à 25 °C). Des abaques (graphiques montrant la relation entre 2 paramètres) permettent de relier précisément température et densité de l'eau. Par gravité, les eaux froides, plus denses, vont se trouver sous les eaux plus chaudes. Ceci explique deux phénomènes caractéristiques des lacs : la stratification de leurs eaux à certaines périodes et leur retournement, leur mélange ou brassage.

La température des lacs dépend de celle de l'air, du vent et de son insolation. En été, le soleil provoque un réchauffement des eaux de surface. Progressivement au cours du printemps et de l'été, il s'installe un gradient thermique stable entre la surface et le fond. On définit 3 zones thermiques (fig. 1) :

- l'épilimnion est la couche superficielle réchauffée. L'eau, mise en mouvement par le vent permet une homogénéisation partielle de la température dans cette zone, dont l'épaisseur varie selon la saison ;
- le métalimnion est la zone intermédiaire où la température décroît rapidement : son épaisseur est de l'ordre de 10 à 15 m ;
- l'hypolimnion est la couche inférieure, toujours froide et à température peu variable, qui se situe en fonction des saisons entre 15 et 30 m sous la surface des lacs.

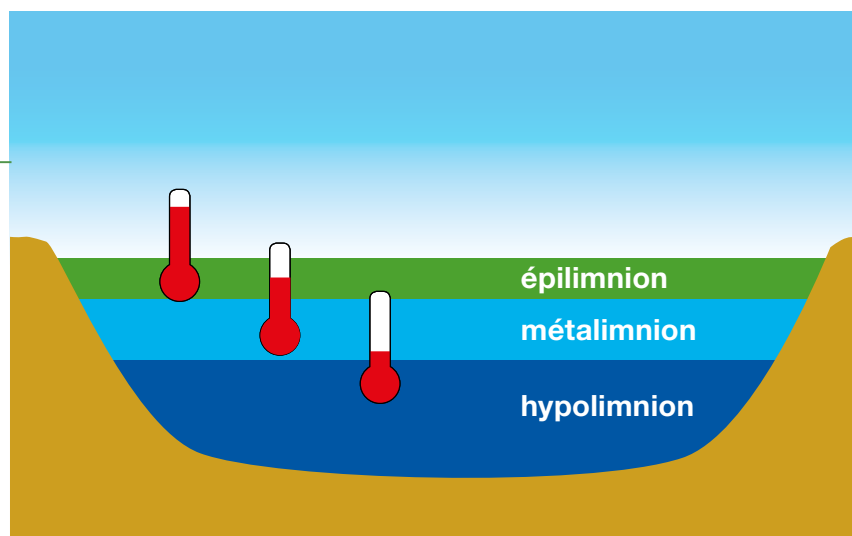
## Comment se produisent le retournement et le brassage des lacs ?

Dans les grands lacs, les températures changent fortement au cours d'un cycle annuel. Au cours de l'automne et de l'hiver pour le Léman et à l'automne et au début de l'hiver pour le lac d'Annecy, les eaux de surface se refroidissent et les températures de surface deviennent plus froides que celles des couches inférieures (qui ont dans les grands lacs une température assez stable quelle que soit la saison).

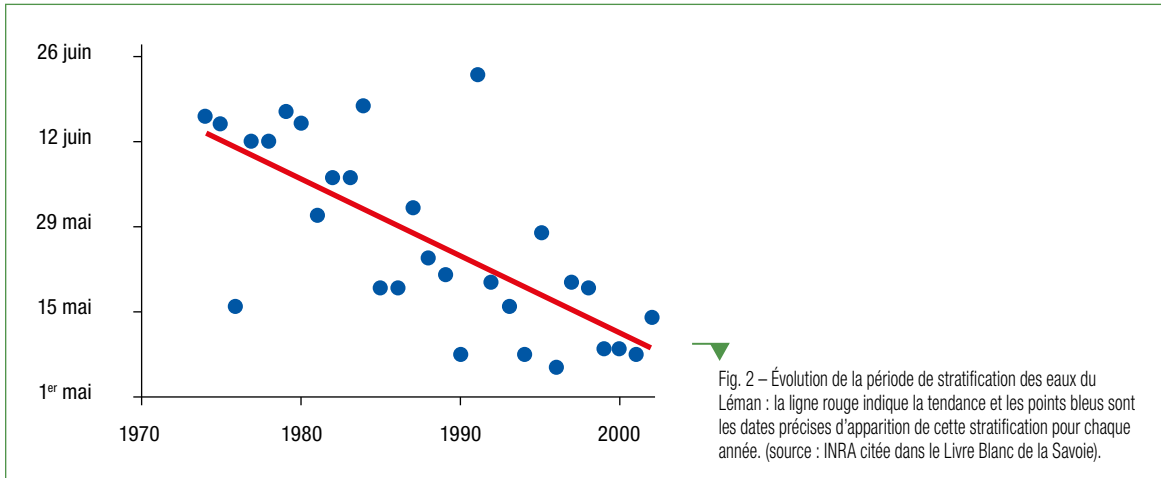
### Tous les lacs se retournent-ils ?

Le phénomène de brassage est généralement présent dans les grands lacs alpins. On parle de lac monomictique quand il y a un brassage par an (cas des lacs du Bourget et d'Annecy), polymictique s'il y en a plusieurs par an.

Fig. 1 – Les trois zones de la stratification thermique (source : AE RMC)







Dans le Léman, de la fin de l'hiver au début du printemps, compte tenu des différences de température entre la surface froide et le fond plus chaud, les masses d'eau de surface, plus froides et donc plus denses, s'enfoncent sous les couches plus chaudes. Le déclenchement de ce phénomène peut être facilité par la présence de vent. Moins un hiver est froid et moins le brassage sera important. Le brassage peut ne pas s'effectuer jusqu'au fond comme cela a été le cas sur le Léman entre 2007 et 2011. Selon l'intensité de ce brassage et les conditions météorologiques de printemps, la stratification thermique se reconstituera plus ou moins rapidement au cours du printemps suivant. Le changement climatique a tendance à avancer la date de stratification, en partie en lien avec la réduction des brassages hivernaux (fig. 2).

Sur le lac d'Annecy, de fin décembre à début mars, toute la colonne d'eau est à la même température. Le vent met en mouvement les masses d'eau permettant un réel brassage.

D'autres facteurs tels que la forme de la cuvette lacustre, la température de l'air et l'intensité des vents viennent compliquer les phénomènes hydrauliques de type : seiches\*, courants, arrivées de gros affluents comme le Rhône dans le Léman (voir question 1-05 : *Y a-t-il des courants et des marées dans les lacs ?*).

### Le brassage hivernal est fondamental pour le fonctionnement écologique d'un lac

Lors de leur descente vers le fond, les eaux froides riches en oxygène vont réoxygéner le milieu. Les éléments nutritifs du fond sont remobilisés et redistribués dans la colonne d'eau, notamment dans la zone euphotique (zone éclairée où s'effectue la photosynthèse).

Le brassage modifie les échanges entre l'eau et les sédiments, ce qui permet de maintenir une biodiversité au fond des lacs (poissons, invertébrés).

### Ce qu'il faut retenir

**Dans les grands lacs alpins, les changements de densité de l'eau liés aux changements saisonniers de température entraînent, en fin d'hiver, le mélange des eaux de surface froides et bien oxygénées avec celles du fond, plus chaudes.**

**Ceci permet le maintien d'une vie diversifiée au fond des lacs et dans les sédiments, mais aussi dans les couches supérieures grâce au brassage qui permet leur fertilisation par les éléments nutritifs redistribués depuis le fond.**

**Seiche** Phénomène d'oscillation de la surface des lacs sous l'action du vent.

# Y a-t-il des courants et des marées dans les lacs ?

► Ulrich Lemmin, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) •

**Les lacs ne sont pas des masses d'eau immobiles et uniformes : l'eau s'y déplace sous l'influence de phénomènes variés et bien identifiés. Il existe des mouvements turbulents de quelques millimètres en quelques secondes et des transferts de grandes masses d'eau sur plusieurs kilomètres en quelques jours. Comment s'organisent tous ces mouvements ?**

## Des grands facteurs qui influent sur le déplacement de l'eau

Le mouvement des masses d'eau est déclenché par le vent et conditionné par la forme du bassin, la stratification thermique (voir question 1-04 : *Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette ?*), et dans les grands lacs, par la force dite de Coriolis\*.

Les lacs sont des écosystèmes de haute valeur de plus en plus sollicités comme réservoirs d'eau potable. Le devenir de polluants ou de contaminants dissous dans ces milieux va être contrôlé par l'ensemble des mouvements d'eau, à différentes échelles. Une bonne connaissance de l'hydrodynamique des lacs est donc un élément essentiel pour comprendre le mélange des substances biogéochimiques, ainsi que l'identification de zones où des contaminants seraient susceptibles de séjourner.

Le vent transfère son énergie à l'eau par frottement et déplace la couche d'eau près de la surface dans la direction du vent. À l'intérieur de la colonne d'eau, cette énergie est transférée vers le bas par frottement provoquant ainsi des mouvements de masses d'eau à l'intérieur du lac.

## Les vents provoquent des mouvements aléatoires

### Une circulation à grande échelle

Les masses d'eau près de la surface, transportées dans la direction du vent, induisent des mouvements de masses d'eau opposés dans les couches de fond. Cette circulation est perturbée localement par les variations de direction et de force du vent. La stratification thermique et la force de Coriolis modifient également ces mouvements et peuvent générer des structures complexes de grands tourbillons, tournant dans des sens différents.

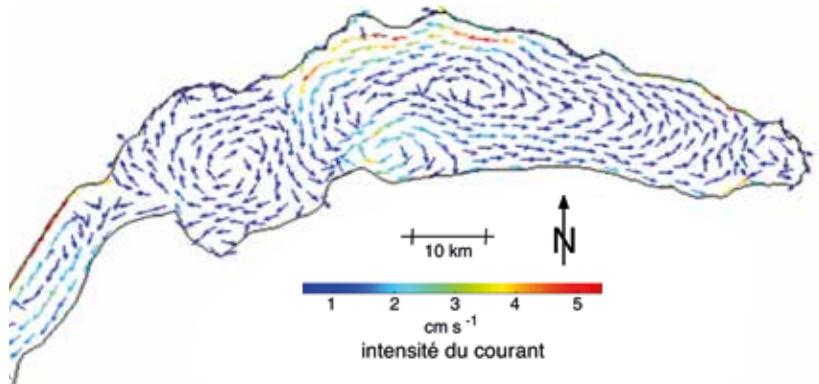


Fig. 1 – Carte des directions et des vitesses moyennées sur la colonne d'eau dans le Léman pendant un événement de vent de Nord-Est. On note la présence de tourbillons. La couleur des flèches indique la vitesse du courant (source : U. Lemmin)

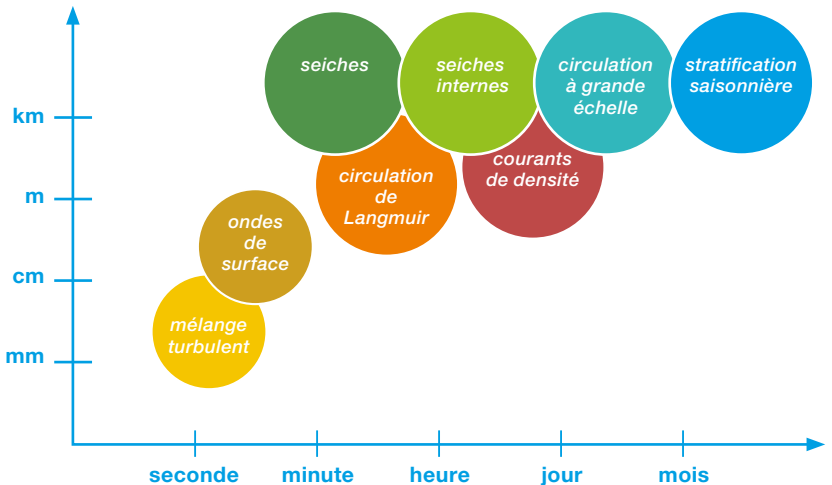


Fig. 2 – Représentation schématique des différents mouvements de l'eau dans les lacs. L'échelle de temps indique la durée du phénomène, l'échelle spatiale, son ampleur. Le diamètre des cercles indique l'étendue sur laquelle ces phénomènes se manifestent. À titre d'exemple, la durée des courants de densité peut varier de quelques heures à plusieurs jours et leur taille s'échelonne en mètres à des kilomètres (source : U. Lemmin)

### Des mélanges turbulents

Le frottement causé par des gradients de vitesse dans les tourbillons à grande échelle génère de la turbulence. Celle-ci induit des mouvements à petite échelle qui mélangent les masses d'eau localement, horizontalement et verticalement. Entre la circulation à grande échelle et la turbulence à petite échelle, on trouve aussi de nombreux processus intermédiaires comme la circulation de Langmuir\* ou les courants de densité (écoulement d'eau de densité plus faible que la masse d'eau du lac) qui se produisent sporadiquement et contribuent aux mouvements des masses d'eau.

### Les vents provoquent des mouvements périodiques

#### Les ondes de surface

Les ondes de surface sont progressives et se déplacent avec le vent. Elles peuvent affecter la dynamique des 10 premiers mètres de la colonne d'eau. Lors de forts vents, elles peuvent déferler, contribuant ainsi de manière significative à l'échange de gaz et de chaleur entre l'air et l'eau.

#### Les seiches de surface

Les seiches de surface sont des ondes stationnaires à l'échelle du bassin. Le vent pousse les masses d'eau vers la côte, provoquant une inclinaison de la surface. Elles ont peu d'importance dans la dynamique des lacs.

#### Les seiches internes

Pendant la saison stratifiée (voir question 1-04 : *Quand les lacs se retournent-ils dans leur cuvette ?*), une thermocline\* se forme. Les eaux de surface s'accumulent à une extrémité du lac sous l'effet du vent. Cette masse d'eau en excès pousse la thermocline vers le bas à l'extrémité du lac sous le vent, ce qui provoque une inclinaison de la thermocline le long de l'axe du lac. Les oscillations de la thermocline commencent dès que le vent cesse, avant de se stabiliser progressivement. Leurs amplitudes peuvent atteindre plusieurs mètres et produisent d'importants mouvements périodiques des masses d'eau se déplaçant en sens inverse au-dessus et en dessous de la thermocline. Dans les grands lacs, la force de Coriolis transforme ces seiches internes en ondes, appelées ondes de Kelvin, qui se déplacent autour du périmètre du bassin du lac.

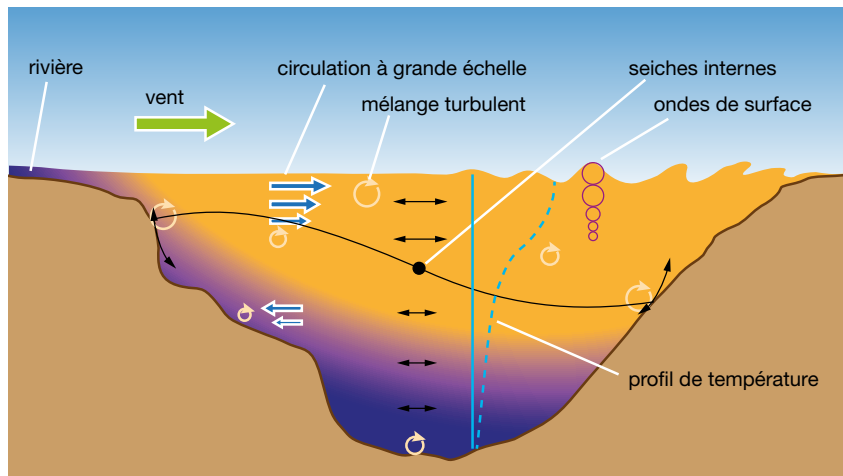


Fig. 3 – Représentation des mouvements aléatoires et périodiques présents dans les lacs stratifiés (source : U. Lemmin)

### Des marées sur les lacs ?

Les marées, causées par l'attraction lunaire, ne sont visibles qu'en présence de grandes masses d'eau. Les lacs alpins, y compris le Léman sont trop petits pour générer des phénomènes de marées visibles.

**Force dite de Coriolis** Force due à la rotation de la terre qui induit un mouvement vers la droite par rapport à la direction du vent.

**Circulation de Langmuir** Série de tourbillons contre-rotatifs à axe horizontal dans la couche supérieure du lac alignée au vent.

**Thermocline** Couche de transition thermique rapide entre les eaux de surface (chaudes) et les eaux profondes (froides).

### Ce qu'il faut retenir

Les lacs sont des masses d'eau en perpétuel mouvement. Ces mouvements, à petite échelle ou à celle du lac, créent des masses d'eau qui ont une certaine hétérogénéité en termes de température et de composition chimique. La connaissance de l'hydrodynamique des lacs est donc importante.

# Les lacs et le Rhône, quelles relations hydrologiques ?

► Renaud Jalinoux, CISALB • François Pasquini, État de Genève •

**Le Rhône traverse le Léman, effleure le Bourget et passe à distance des deux autres lacs. En régime hydrologique courant, les relations sont claires, chacun contribuant au débit du Rhône. En période de crue, comme en période de sécheresse, les relations sont plus compliquées.**

## Trois configurations différentes

Après 165 km parcourus depuis leur source dans le glacier du Gothard, les eaux du Rhône se fondent dans celles du Léman. 70 km plus loin, à Genève, le fleuve renaît.

Avec le lac du Bourget, le Rhône entretient une relation réciproque; le canal de Savières, long de 4,5 km et reliant les deux masses d'eau, peut couler dans les deux sens. L'eau des lacs d'Annecy et d'Aiguebelette ne coule que dans un sens, des lacs vers le Rhône, via respectivement le Fier et le Guiers (fig. 1).

## Les relations entre lacs et Rhône en régime moyen

Le débit moyen du fleuve est de 182 m<sup>3</sup>/s à l'entrée du Léman et de 250 m<sup>3</sup>/s à sa sortie, à Genève. Ces 68 m<sup>3</sup>/s supplémentaires sont apportés par les rivières drainant le bassin versant du Léman (2 767 km<sup>2</sup>).

En aval du lac, le débit croît avec les deux principaux apports haut-savoyards de l'Arve (74 m<sup>3</sup>/s) et du Fier (41 m<sup>3</sup>/s) pour atteindre 335 m<sup>3</sup>/s à Pougny puis 418 m<sup>3</sup>/s à Brens. La contribution des trois lacs français est bien plus faible : 8,2 m<sup>3</sup>/s pour le Thiou (exutoire du lac d'Annecy), 13 m<sup>3</sup>/s pour le canal de Savières (exutoire du lac du Bourget) et 1,7 m<sup>3</sup>/s pour le Thiers (exutoire du lac d'Aiguebelette). L'apport des trois lacs ne représente que 4 % du débit moyen annuel du Rhône à Lyon (600 m<sup>3</sup>/s avant la confluence avec la Saône).

Le débit du Rhône, en quittant la Savoie, est constitué à 45 % d'eau provenant du Rhône à l'amont du Léman, à 17 % du bassin lémanique (dont la Dranse) et à 18 % de l'Arve (fig. 2).

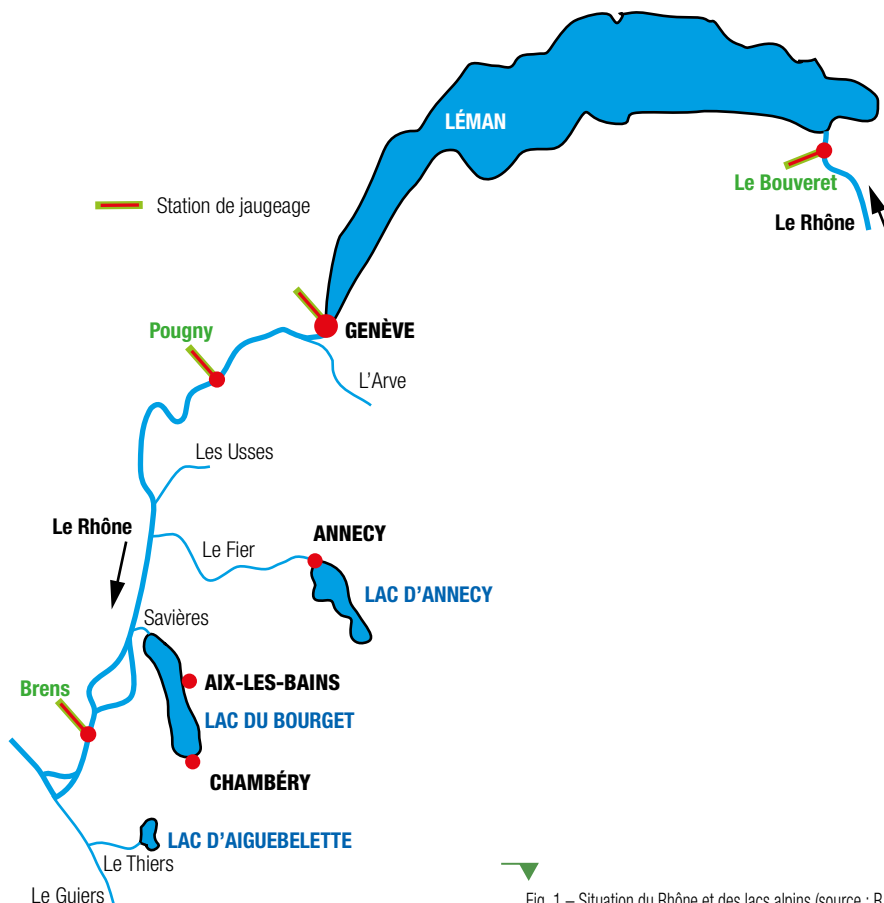


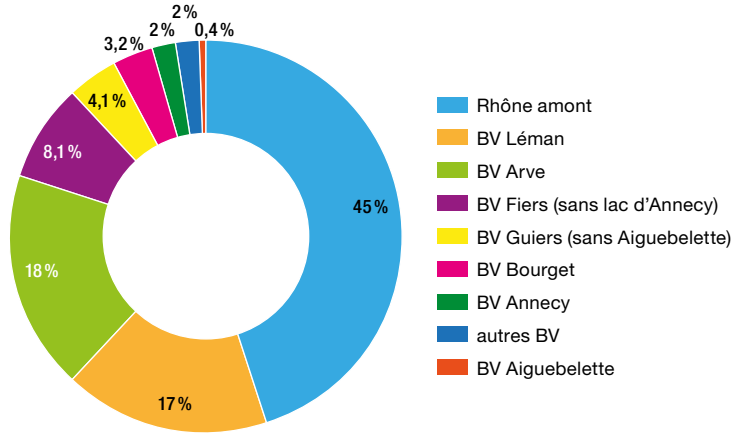
Fig. 1 – Situation du Rhône et des lacs alpins (source : R. Jalinoux)

### La crue de février 1990

En période de crue, les lacs jouent un rôle important, en stockant temporairement l'eau apportée par les bassins versants. Leur capacité d'écrêtement (de rétention des eaux) dépend des apports du bassin versant et de la superficie du lac. Monter de 10 cm le niveau d'eau des lacs équivaut à stocker un volume de 58 millions de m<sup>3</sup> dans le Léman, de 4,5 millions de m<sup>3</sup> dans le lac du Bourget, de 2,7 millions de m<sup>3</sup> dans le lac d'Annecy et de 0,5 million de m<sup>3</sup> dans le lac d'Aiguebelette.

Lors de la crue du 13 au 17 février 1990, centennale sur le Haut-Rhône français, le stockage dans les lacs et l'étalement de l'eau dans les zones inondables ont permis de réduire le débit de la crue en aval. Les lacs sont montés respectivement de 0,28 m sur le Léman, de 0,70 m sur le lac d'Annecy, de 2,50 m sur le lac du Bourget. Ce sont près de 300 millions de m<sup>3</sup> qui ont été ainsi stockés dans les lacs ! L'inondation naturelle de la plaine de Chautagne et la montée du lac du Bourget permettent, à eux seuls, d'écrêter jusqu'à 35 % du débit de pointe d'une très forte crue du Haut-Rhône (885 m<sup>3</sup>/s sur 2500 m<sup>3</sup>/s).

Fig. 2 – Contributions des différents bassins versants au débit moyen du Rhône après sa confluence avec le Guiers (source : R. Jalinoux)



### La sécheresse et la canicule de l'été 2003

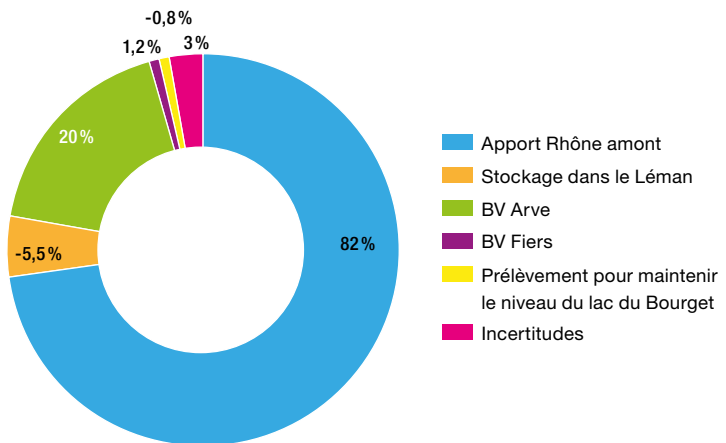
En période d'étiage\*, les lacs alpins ne sont pas d'un grand recours pour gonfler le débit du Rhône. Lors de l'été 2003 (fig. 3), le déficit de précipitations a fait chuter les débits d'apport des bassins versants. La canicule a amplifié l'évaporation sur les lacs.

À la mi-août, le lac d'Annecy a baissé de 0,49 m et celui d'Aiguebelette de 0,53 m. Les deux autres lacs ont subi des sorts bien différents.

Le niveau du lac du Bourget a été maintenu à son niveau d'été grâce à un apport de 15 m<sup>3</sup>/s du Rhône pendant 3 semaines. Sans cette intervention de la Compagnie Nationale du Rhône prévue dans la consigne d'exploitation du barrage de Savières (voir question 6-05 : *Comment et pourquoi le niveau des lacs est-il régulé?*), le lac aurait baissé de 1 m.

Le Léman, malgré une forte évaporation, a été alimenté par la fonte des glaciers du Rhône amont dont l'eau a été stockée (près de 175 millions de m<sup>3</sup> d'eau) dans trois grands barrages suisses pour être turbinée plus tard en hiver, lors des pointes de consommation énergétique.

Fig. 3 – Contributions des différents bassins versants au débit moyen du Rhône après sa confluence avec le Guiers lors de l'été 2003 (juin, juillet et août) (source : R. Jalinoux)



### Ce qu'il faut retenir

**Le Rhône entretient avec chaque lac alpin des relations hydrologiques différentes, liées aux situations géographiques rencontrées. Lors des inondations, les lacs ont un rôle d'écrêteur de crue du Rhône. En période d'étiage, les lacs d'Annecy et d'Aiguebelette voient leur ligne d'eau baisser tandis que celles du lac du Bourget et du Léman sont maintenues artificiellement.**

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

# Les lacs engendrent-ils un microclimat ?

► Jean-François Georgis, Université Toulouse III, Laboratoire Aérologie • Gilles Bruno, Météo-France, Chamonix •

**Les lacs peuvent-ils modifier localement les conditions atmosphériques et favoriser des phénomènes météorologiques particuliers? Il suffit d'observer l'attrait des rives des lacs lors des chaleurs estivales ou de se laisser aller à la rêverie devant la dissipation des brumes automnales au-dessus d'un lac pour se convaincre de leur influence locale sur le climat. Pour le démontrer, il faut étudier les propriétés physiques de l'eau en contact avec l'air.**

## Le lac comme climatiseur naturel

L'eau se trouve naturellement sous trois formes distinctes : solide (glace), liquide, vapeur. Le passage de l'état solide à liquide, puis vapeur (lorsque l'eau s'évapore) nécessite un apport de chaleur. Ces changements d'états successifs, dans l'ordre indiqué, se produisent donc lorsque l'eau, quelque soit son état, est en contact avec un air plus chaud. Le transfert de chaleur qui s'opère alors de l'air vers l'eau abaisse localement la température de l'air. D'où la sensation de relative fraîcheur ressentie au voisinage d'un plan d'eau soumis au phénomène d'évaporation, lors des chaudes journées d'été.

L'eau, surtout en phase liquide, est caractérisée par sa grande inertie thermique. En 24 heures, alors que la température de l'air peut être élevée en journée et fraîche la nuit, celle de l'eau ne varie quasiment pas. Pour la même raison, le changement de température de l'eau au fil des saisons n'est pas aussi rapide que pour l'air. Le contraste thermique entre l'air et l'eau est d'autant plus perceptible que le volume d'eau est grand. Un lac peut donc être considéré comme un réservoir accumulant de la chaleur l'été (essentiellement le jour) pour en libérer lorsque la température de l'air est plus faible (essentiellement l'automne et l'hiver). Voilà pourquoi le Léman, qui est le plus grand lac d'Europe Centrale, est aussi celui où le climat est le plus doux.

## Le lac comme convecteur naturel

Lorsque la température de l'eau est supérieure à celle de l'air, le lac peut être considéré comme une source locale de chaleur. C'est le cas l'hiver, mais aussi l'été et l'automne entre le coucher du soleil et son lever le lendemain. L'air, au contact de la surface du lac, subit alors un réchauffement. Cet air plus chaud, donc plus léger que la masse d'air environnante monte, en altitude. La chaleur puisée au niveau du lac est alors transmise aux couches supérieures de l'atmosphère. Ce chauffage par convection cesse à une certaine altitude. En montant, l'air se refroidit.

## Brume, brouillard, nuages : de l'eau dans le gaz !

Lorsque l'eau s'évapore, l'air qui est un mélange gazeux s'enrichit en vapeur d'eau. À partir d'un certain seuil, la vapeur d'eau en excès dans l'air se transforme spontanément en liquide : c'est le phénomène de condensation. Ce seuil est d'autant plus vite atteint que la température de l'air est basse. Aussi, l'hiver ou



Photo 1 – Le lac du Bourget en été (© CISALB)



Photo 2 – Coup de vent sur les roselières de la rive ouest du lac d'Annecy (© D. Zanella – SILA)

**Températures moyennes des postes de mesures les plus proches des 4 lacs alpins**

Hiver (déc.-fév.)	Minimum	Maximum	Moyenne
<b>Novalaise</b> (Aiguebelette)	-1,8	6,3	<b>2,2</b>
<b>Vogland</b> (Bourget)	-0,6	7,0	<b>3,2</b>
<b>Cran-Gevrier</b> (Annecy)	-1,5	6,5	<b>2,5</b>
<b>Évian-les-Bains</b> (Léman)	0,9	5,5	<b>3,2</b>

Été (juin-août)	Minimum	Maximum	Moyenne
<b>Novalaise</b> (Aiguebelette)	12,4	26,1	<b>19,2</b>
<b>Vogland</b> (Bourget)	14,3	26,4	<b>20,3</b>
<b>Cran-Gevrier</b> (Annecy)	13,2	26,2	<b>19,7</b>
<b>Évian-les-Bains</b> (Léman)	15,6	24,5	<b>20,0</b>

Du fait de la distance au lac de la station de Novalaise, et de la taille du lac, il n'est pas sûr que celui-ci influence son propre climat.

lors des nuits fraîches d'automne, on observe de la condensation dans la masse d'air humidifiée par l'évaporation à la surface du lac : c'est l'apparition de la brume ou de brouillard (photo 3). La dissipation de ce phénomène météorologique survient ensuite, souvent le matin en automne et plus tard en hiver, lorsque le réchauffement solaire devient suffisant pour assécher la masse d'air.



Photo 3 – Le Léman sous la brume (© J.-M. Zellweger)

Si l'air au contact du lac n'est pas suffisamment froid, le phénomène de condensation ne peut pas se produire au niveau du plan d'eau. En fonctionnant comme un convecteur, le lac déplace alors le niveau de condensation vers des altitudes plus élevées : l'air réchauffé et humidifié par le lac se refroidit progressivement au cours de son ascension, si bien qu'à un moment donné, la vapeur d'eau qu'il contient commence à se transformer en eau liquide. Ainsi apparaît la base d'un nuage.

Le phénomène de condensation s'accompagne d'une libération de chaleur, celle qui a été emmagasinée par l'eau lors de son passage de l'état liquide à vapeur au cours de l'évaporation au-dessus du lac. La parcelle d'air humide, au sein de laquelle se produit la condensation, subit un réchauffement qui lui permet de monter en altitude. Ainsi le nuage se développe; son extension verticale dépend de la chaleur, mais aussi de la quantité de vapeur d'eau cédée à l'air par le lac. L'eau liquide constituant le nuage apparaît d'abord sous forme de gouttelettes qui, par collision, forment ensuite des gouttes plus grosses. Lorsque leur poids devient trop important, les gouttes ne peuvent plus se maintenir dans l'air ascendant et tombent au sol : il pleut.

**Ce qu'il faut retenir**

**Un lac est un excellent régulateur de la température de l'air localement. Les changements de température de l'eau n'étant pas aussi rapides que pour l'air, un lac rafraîchit l'atmosphère l'été et la réchauffe l'hiver.**

**L'évaporation de l'eau en surface du lac enrichit l'air en humidité, ce qui provoque des brumes et brouillards en hiver, quand l'air est suffisamment froid. L'été, la condensation ne peut alors survenir qu'en altitude, là où la température est suffisamment faible.**

# Quelles sont les relations entre le bassin versant et le lac ?

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

**Les lacs ne sont pas des systèmes isolés : comprendre leur état et leur fonctionnement nécessite de prendre en compte les flux provenant de leur environnement. Malgré leur taille, les grands lacs ne sont pas soustraits à ces pressions et notamment à l'influence majeure du territoire qui les alimente en eau : leur bassin versant. Quelle est donc la nature des liens entre lac et bassin versant ?**

## Le bassin versant : une composante clé de l'environnement des lacs

L'influence du bassin versant sur son lac s'exerce principalement via les affluents qui le drainent et apportent de l'eau, de l'énergie, des matières solides et dissoutes. Ces apports déterminent le temps de séjour de l'eau dans le lac, contribuent à son brassage, régulent sa composition, en particulier en nutriments et polluants (voir question 1-03 : *Combien de temps faut-il pour renouveler les eaux d'un lac ?*).

L'intensité des relations bassin-lac dépend de facteurs fixes comme la topographie, le rapport entre la surface du lac et son bassin, les caractéristiques géologiques et de facteurs variant dans le temps comme les activités humaines, les structures paysagères et le climat.

À long terme, les apports aboutiront inévitablement au comblement de la cuvette lacustre (théoriquement dans environ 600 000 ans pour le Léman).

## Le bassin versant : le lieu de connexion entre eau et territoire

Le bassin versant est un système géographique qui assemble roches, pentes, sols, végétations, collecte les précipitations, détermine la distribution spatiale de l'eau et organise les écoulements dans un réseau de cours d'eau convergeant vers un exutoire, le cas échéant un lac. Le bassin est délimité en surface par les plus hautes altitudes le ceinturant. Ses limites souterraines sont plus délicates à établir. Le



Photo 1 – Le lac d'Aiguebelette et son bassin versant rural (© D. Roux-Michollet – GRAIE) ◀

bassin versant ne collecte pas que de l'eau : celle-ci ayant la capacité de dissoudre, d'éroder et de transporter, elle acquiert une charge de matières particulières et dissoutes qui résulte d'une part de son action sur les roches et les sols et d'autre part des activités humaines. C'est ainsi que le fonctionnement des bassins contrôle la composition des eaux fournies aux lacs, y compris les charges polluantes.

L'eau qui s'écoule contient tout d'abord un ensemble de composés chimiques dissous, libérés par l'altération des roches. La plupart des composés constituant ce fond géochimique minéral sont quantitativement peu affectés par les activités humaines (Calcium, Magnésium, Silicium...). Quelques autres, tout aussi naturels, présentent au contraire des flux très influençables par ces activités. C'est le cas des chlorures et des nutriments (Azote, Phosphore) dont la teneur dans les eaux s'accroît considérablement (d'un facteur de 10 à 100) du fait de rejets (salage, eaux usées) et/ou d'apports sur les sols (fertilisations, matières organiques, décharges).

C'est aussi le cas des métaux dits lourds (Cadmium, Zinc, Cuivre...), largement associés aux matériaux de construction et à l'industrie locale. L'eau se charge aussi, localement, de molécules de synthèse (produits pharmaceutiques, colorants, détergents, pesticides...); les quantités en cause sont faibles mais ces flux sont sous surveillance dans la crainte de contaminations et d'effets écotoxicologiques cumulés sur les milieux lacustres récepteurs (voir question 3-07 : *Que deviennent les micropolluants introduits dans les lacs ? Quels sont les risques associés ?*).



S'ajoutent enfin à ce cocktail, des matières humiques originaires pour l'essentiel des sols forestiers, prairiaux et des marais, des microbes comprenant éventuellement des pathogènes (dont la persistance est variable dans les eaux, par exemple de l'heure à l'année pour les diverses bactéries fécales), et enfin des particules issues de l'érosion des sols et des berges. Particules et matières humiques sont susceptibles de fixer et donc de transporter toute une série de composés (Phosphore, Cadmium, Zinc, PCB...).

Le réseau hydrographique, en assurant le transport de toutes ces charges solides et dissoutes, réalise la connexion entre le lac et son bassin versant. Pendant le transport, divers phénomènes sont susceptibles de modifier, voire d'atténuer, la charge polluante des eaux (dégradation, stockage).



Photo 2 – Vignobles de Lavaux surplombant le Léman (© J.-M. Zellweger)

### Les relations entre bassin versant, occupation de sols et pollutions

**Un bassin rural** transfère des charges issues des rejets d'eaux usées (pollution dite ponctuelle) et des écoulements sur et dans les sols (pollution dite diffuse). La charge totale, riche en nutriments dissous, est potentiellement très impactante sur les lacs alpins par son excès de phosphore et parfois de contaminants microbiens, avec de très fortes teneurs à des périodes clés pour le lac (étiage et crues estivales). Les cultures intensives ajoutent des pesticides et les sols nus

en période hivernale, des érodats (produits de l'érosion). La présence dans le paysage de zones tampons (haies, ripisylves, bandes herbeuses, certains marécages) permet d'intercepter une partie des charges polluantes.

**Un bassin urbain et périurbain** offre souvent une charge en nutriments plus faible (les eaux usées sont plus efficacement collectées et traitées) mais exporte tout un cocktail de micropolluants.



Photo 3 – Une rive urbanisée du lac d'Anney (© D. Laffon)

### Ce qu'il faut retenir

À l'issue de son transit dans le bassin versant, l'eau acquiert une charge dissoute et particulaire, organique et minérale, dont l'impact sur le lac est une question de composition, de dose, de régime d'apport et de mécanismes lacustres. La gestion des bassins versants est un élément essentiel pour contrôler la qualité des grands lacs alpins.

