

# La couverture de glace des lacs et rivières

## L'évolution du climat de source historique

Les lacs gèlent d'autant plus tôt et dégèlent d'autant plus tard que les hivers sont longs et rigoureux. Nous concevons intuitivement cette évidence sans chercher à connaître les phénomènes météorologiques complexes qui sont à la base de cette observation. L'EAWAG a voulu en savoir plus en analysant des données historiques sur les dates de gel et de dégel de plusieurs lacs et rivières, notamment du lac de St-Moritz et du lac Baïkal en Sibérie. Ces séries de données permettent de dégager les tendances climatiques du passé et d'envisager celles du futur.

Le moment du gel des lacs ou des rivières en hiver et de leur dégel au printemps dépend de divers facteurs météorologiques. Le plus important d'entre eux est sans aucun doute la température de l'air. De manière empirique, on peut donc considérer la formation et la fonte de la couche de glace comme des réactions temporelles aux variations saisonnières de la température de l'air. A l'inverse, il est également possible d'évaluer la température de l'air qui régnait par le passé à proximité des lacs et rivières en étudiant les données historiques sur les dates de gel et de dégel. Etant donné que les valeurs de la température de l'air sont en général corrélées entre elles sur de grandes distances, souvent des centaines de kilomètres, les variations historiques de la durée

des glaces livrent une information non seulement sur les changements des conditions météorologiques locales mais également sur certaines variations climatologiques à l'échelle régionale ou même suprarégionale, ce qui est autrement plus intéressant.

### La couverture de glace sous l'influence des changements climatiques?

Des données historiques sur les dates de formation et de fonte de la couverture de glace (respectivement définies comme le premier jour de couverture totale et le premier jour absolument sans glace) de lacs et de rivières du Canada, des USA, de Finlande, de Suisse, de Russie et du Japon ont apporté la preuve que les lacs et cours

d'eau de l'hémisphère nord gèlent plus tard et dégèlent plus tôt depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle (Fig. 1) [1]. Ces décalages à long terme du début et de la fin de la couche de glace sont en moyenne de 6 jours sur 100 ans, ce qui correspond à un réchauffement de l'air de 1,2 °C sur cette même période. Ces données historiques viennent

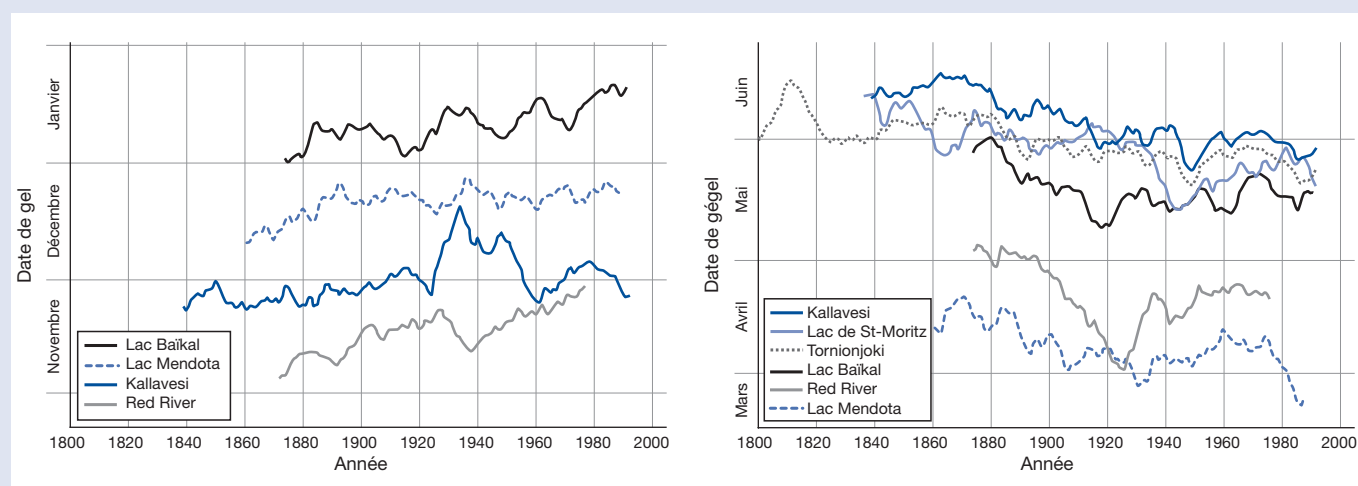




Fig. 2: Course de chevaux sur le lac de St-Moritz gelé.

donc non seulement étayer l'hypothèse d'un réchauffement global amorcé dans le passé et perdurant de nos jours, mais elles permettent de surcroît une certaine prédiction des effets du réchauffement planétaire à venir sur les dates de gel et de dégel du bouclier de glace des lacs et rivières. Si le réchauffement se poursuit conformément aux prévisions, la durée de persistance de la glace sera toujours plus brève et son épaisseur toujours plus faible, ce qui devrait avoir des répercussions aussi bien négatives que positives tant sur le plan socio-économique que sur le plan écologique. Sous les grandes latitudes, le transport des personnes et des biens sur la banquise des grands lacs comme le lac Baïkal en Sibérie ou sur les grandes rivières comme la rivière Yukon en Alaska pourrait ainsi être rendu plus difficile et plus coûteux. A l'inverse, sur le lac Supérieur en Amérique du Nord, l'effet d'un allongement de la durée sans glace serait bénéfique aux transports qui s'y effectuent par bateau. D'un point de vue écologique, le raccourcissement de la durée de la glace induirait une meilleure oxygénation des lacs normalement recouverts d'un bouclier de glace pendant presque tout l'hiver [2]. Ceci aurait d'une part pour conséquence de limiter le risque de mortalité pour les poissons pendant l'hiver mais provoquerait également un brassage précoce des eaux au printemps qui s'accompagnerait d'une initiation hâtive de l'efflorescence de phytoplancton. Cette précocité serait plutôt néfaste, le phytoplancton devant alors croître sous une intensité lumineuse plus faible que

s'il s'était développé plus tard. Il faut donc également s'attendre à ce qu'intervenant à cette période cruciale de l'année, ces changements se répercutent sur la composition des communautés phytoplanctoniques dont une modification ne manquerait pas de s'accompagner d'autres conséquences écologiques.

### Données sur les glaces du lac de St-Moritz

Le lac de St-Moritz, situé à 1778 m d'altitude en Haute Engadine (Fig. 2), livre la série de données la plus ancienne de Suisse sur les dates de gel et de dégel de la couverture de glace. Cette précieuse source d'informations, unique en son genre en Europe, couvre sans interruption la période de 1832 à nos jours. On dispose d'autre part depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle de mesures instrumentales fiables de la température de l'air provenant de différentes stations météorologiques suisses et européennes. En confrontant ces séries de données, nous avons étudié la relation entre la fonte des glaces du lac de St-Moritz et l'évolution des températures de l'air correspondantes.

### La couverture de glace sous l'influence du climat suprarégional

La date moyenne de dégel du lac de St-Moritz est le 12 mai. Notre analyse (Fig. 3) a montré qu'il existait entre cette date de dégel et la température de l'air une corrélation caractérisée par une part maximale de variance commune ( $r^2$ ) de 64% [3],

ce qui signifie que 64% de la variabilité de la date de dégel s'explique statistiquement par la variabilité de la température de l'air. Il est donc possible d'évaluer approximativement la température moyenne locale au printemps sur une période de 4 à 8 semaines à partir des données de dégel (Fig. 3). Mais il existe également une bonne corrélation entre la date de fonte de la glace du lac de St-Moritz et les températures de l'air dans des localités plus éloignées [3, 4]. Ainsi, si l'on s'appuie sur les données de température de la station météorologique de Neuchâtel située à quelque 230 km du lac, on obtient un pourcentage de variance commune de 61%, donc à peine plus faible que pour les données locales (Fig. 3). Cette observation révèle que le dégel du lac de St-Moritz, et de bien d'autres lacs alpins, constitue avant tout une réponse au climat régional et n'est que secondairement influencé par les événements météorologiques locaux.

Cette thèse se trouve appuyée par l'observation d'une corrélation encore plus étroite à l'échelle suprarégionale, si on compare

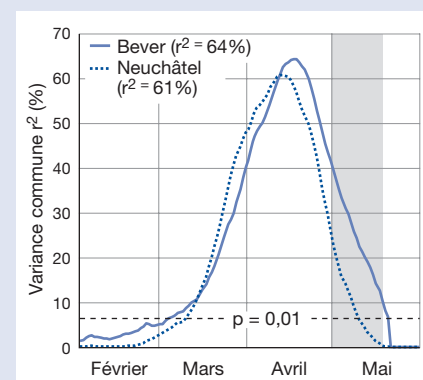


Fig. 3: Part de variance commune ( $r^2$ ) entre la date de dégel du lac de St-Moritz (Haute Engadine, Suisse) et la température de l'air moyennée sur 51 jours, mesurée à Bever, à 7 km du lac, et à Neuchâtel, à 230 km à l'ouest du lac. Chaque courbe a été tracée à partir des valeurs de  $r^2$  calculées pour 120 différentes périodes de 51 jours et reportées sur la date marquant le milieu de chacune de ces périodes. La bande ombragée correspond à la période habituelle de fonte des glaces du lac (date moyenne  $\pm$  1 écart-type). La ligne pointillée indique le seuil de significativité  $p = 0,01$ . D'après [3], modifié.



Fig. 4: En hiver, personnes et biens circulent à la surface du lac Baïkal.

par exemple les dates de dégel du lac de St-Moritz avec les températures de l'air en Grande-Bretagne ou aux Pays-Bas. Par contre, la corrélation cesse d'être significative si on se réfère aux températures moyennes de l'ensemble de l'hémisphère nord. L'influence du climat sur le dégel des lacs semble donc se manifester à une échelle plus suprarégionale que globale. Un article apparenté (p. 23) décrit la relation entre la

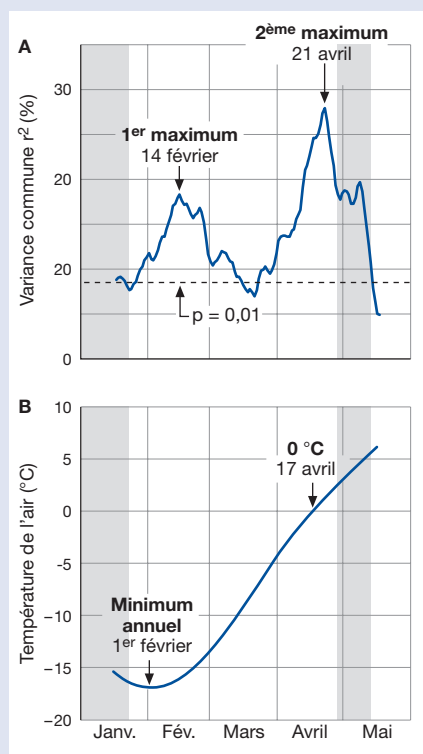


Fig. 5: (A) Part de la variance commune ( $r^2$ ) entre les dates de dégel observées à Listvyanka dans la partie sud du Baïkal et les températures de l'air mesurées à la station météo de Babouchkine au sud du lac Baïkal moyennées sur 31 jours.

(B) Evolution saisonnière de la température de l'air moyennée sur 31 jours tracée à partir de données récoltées de 1931 à 1994 à Babouchkine.

Les valeurs  $r^2$  présentent deux maxima situés respectivement les 14 février et 21 avril (A). Ces deux dates suivent de peu celles du minimum annuel de température (le 1<sup>er</sup> février) et du passage de la courbe des températures à travers la ligne 0°C (le 17 avril). Les bandes ombragées correspondent aux périodes habituelles de gel et de dégel dans la partie sud du Baïkal (date moyenne  $\pm 1$  écart-type). La ligne pointillée correspond au seuil de significativité  $p = 0,01$ . D'après [5], modifié.

date de dégel des eaux de l'hémisphère nord et l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO).

### Données sur les glaces du lac Baïkal

Le Baïkal en Sibérie orientale est le lac d'eau douce le plus profond (env. 1650 m) et le plus volumineux (env. 23 000 km<sup>2</sup>) du monde (Fig. 4). Il dépasse 600 km de long pour une largeur moyenne de 50 m et ne contient pas moins de 20% de la quantité totale d'eau douce disponible à l'état liquide à la surface de notre planète. D'après les estimations, ce lac est vieux de plus de 25 millions d'années et présente la biodiversité la plus élevée de tous les lacs existant à l'heure actuelle, son écosystème exceptionnel étant composé de près de 1500 espèces et sous-espèces dans le règne végétal et de plus de 3500 dans le règne animal.

Le Baïkal est gelé de quatre à cinq mois par an. On observe cependant un gradient nord-sud le long du lac étant donné les différents climats qu'il traverse et qui induisent des différences tant au niveau des dates de formation de la couverture de glace que de sa fonte. Le lac commence à geler fin octobre. La majeure partie du bassin septentrional est en général couverte de glace avant début décembre alors que le bassin méridional ne gèle au plus tôt qu'un mois plus tard. Dans la partie sud du lac, la fonte de la glace s'amorce en général entre fin mars et début avril, alors qu'elle ne commence que de deux à trois semaines plus tard au nord. Le bassin sud est généralement totalement dégelé à partir de la mi-mai. Etant donné

l'importance de ces différences nord-sud, l'observation des glaces du Baïkal doit nécessairement se limiter à une zone précise du lac. Pour le bonheur des chercheurs, la date de fonte du bouclier de glace a été relevée en continu depuis 1869 à la station limnologique de Listvyanka dans la partie sud du Baïkal.

### Un autre paramètre d'influence: La température minimale annuelle de l'air

Comme pour le lac de St-Moritz, les dates de dégel du Baïkal étaient fortement corrélées à la température de l'air (pic de droite, Fig. 5A). La situation du lac Baïkal paraît toutefois plus complexe si on en juge par l'existence d'une deuxième corrélation significative observable plus tôt dans l'année (pic de gauche, Fig. 5A) [5]. Il se trouve en effet que la date de fonte de la banquise du Baïkal ne dépend pas uniquement de la température de l'air au moment du dégel au printemps mais également de la température minimale pendant la période la plus froide de l'hiver sibérien (Fig. 5B). Cette dernière définit d'une part l'épaisseur maximale atteinte par le bouclier de glace – plus cette température est basse, plus la glace est épaisse – mais aussi, d'autre part, l'épaisseur de la couche de neige isolante qui se dépose à sa surface – plus la température minimale est basse, moins il neige. La température de l'air au mois de mars, peu avant l'amorce du dégel, se situe en général en dessous de zéro mais reste supérieure au minimum annuel et n'a d'influence ni sur

l'épaississement de la banquise ni sur sa fonte (Fig. 5B). Elle a donc une importance bien moindre que les températures de février et d'avril pour la date de dégel du lac. Comme dans le cas du lac de St-Moritz, les dates de dégel du Baïkal ne sont pas uniquement corrélées avec les températures locales mais également avec celles qui règnent dans des endroits éloignés, en l'occurrence dans le nord de l'Asie. Cette constatation est particulièrement valable pour les mois de février et d'avril (Fig. 6).

### Influence du changement climatique sur la couverture de glace

Dans le cadre d'un autre projet, nous avons étudié les dates de dégel des quatre dernières décennies de 196 lacs suédois répartis sur 13 degrés de latitude suivant un gradient nord-sud [6, 7]. Notre analyse a montré que la relation entre la date de dégel et la température de l'air était non-linéaire. Cela signifie concrètement que les lacs des régions chaudes (en général plus méridionales) réagissent plus fortement aux changements climatiques que ceux des régions froides (généralement plus septentrionales). Autrement dit: plus le réchauffement planétaire progressera, plus il aura d'influence sur

le dégel des lacs et donc sur les processus écologiques qui leurs sont propres.

### Les séries de données servent d'archives pour la prédiction du climat

Nos résultats montrent que les observations historiques des dates de gel et de dégel des lacs et rivières donnent des indications précieuses sur le climat régional à supra-régional du passé. En effet, elles permettent aussi bien de reconstituer l'évolution du climat sur plusieurs siècles que de suivre sur quelques années ou quelques décennies ses variations à plus court terme. De plus, les séries de données fournissent des informations de valeur pour la prédiction de l'impact des changements climatiques à venir sur les glaces des lacs et rivières. Etant donné que la durée et l'épaisseur de la couverture de glace subissent davantage l'influence du climat à l'échelle suprarégionale que celle de manifestations locales des changements globaux, il ne semble pas nécessaire d'appuyer les prédictions sur des modèles climatiques à haute résolution spatiale (dont nous ne disposons de toute façon pas encore actuellement). Pour statuer sur l'avenir écologique et physico-chimique des lacs et rivières situés à des latitudes éle-

vées, il est très important de savoir s'ils seront couverts de glace en hiver et combien de temps cette couverture persistera. C'est donc par l'estimation de la couverture de glace à venir de ces eaux que devra passer toute tentative de prédiction de l'impact éventuel des changements climatiques sur les ressources en eau à l'échelle de la planète.

Les études scientifiques présentées dans cet article ont été réalisées dans le cadre des projets européens MOLAR, EMERGE, REFLECT, CLIME et Euro-limpac.



David M. Livingstone est physicien et spécialiste d'analyse de données au sein de la division «Ressources en eau et eau potable» de l'EAWAG. Ses activités se concentrent sur les effets passés, présents et futurs des changements climatiques sur les ressources en eau en Europe.

[1] Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuglinski V.S. (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289, 1743-1746.

[2] Livingstone D.M. (1993): Lake oxygenation: application of a one-box model with ice cover. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 78, 465-480.

[3] Livingstone D.M. (1997): Break-up dates of Alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change* 37, 407-439.

[4] Livingstone D.M. (1998): Das Auftauen des St. Moritzer Sees: Ein Indikator für überregionale Lufttemperatur und globalen Vulkanismus. *EAWAG Jahresbericht* 1997, Dübendorf, 41-42.

[5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486-1497.

[6] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (2004): Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical Research Letters* 31 (7), L07203, doi:10.1029/2004GL019530.

[7] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (in press): Systematic differences in the trend towards earlier ice-out on Swedish lakes along a latitudinal temperature gradient. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* 29.

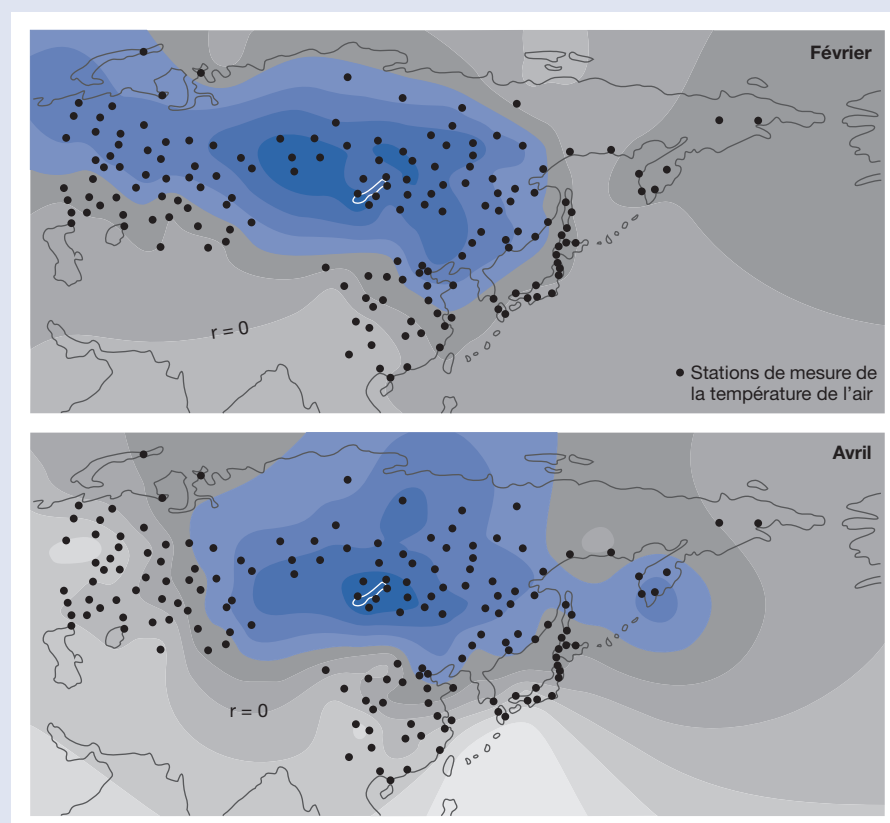


Fig. 6: Représentation en courbes de niveau («contour plot») des coefficients de corrélation entre les dates de dégel dans la partie sud du lac Baïkal et les moyennes mensuelles en février et en avril de la température de l'air dans 170 stations de mesure réparties sur la Russie, le Kazakhstan, la Chine et le Japon (1936-1989). La corrélation est maximale dans la zone en bleu ( $r < -0,2$  est significatif pour un seuil de significativité approximatif de  $p < 0,01$ ). L'intervalle entre les courbes de niveau est de 0,1. Le contour du lac Baïkal est indiqué en blanc. D'après [5], modifié.