

Ressources en eau et changement climatique



Rolf Kipfer (à gauche), géophysicien, professeur titulaire à l'EPF de Zurich et directeur du département « Ressources en eau et Eau potable » de l'Eawag et David M. Livingstone, physicien et analyste de données, même département.

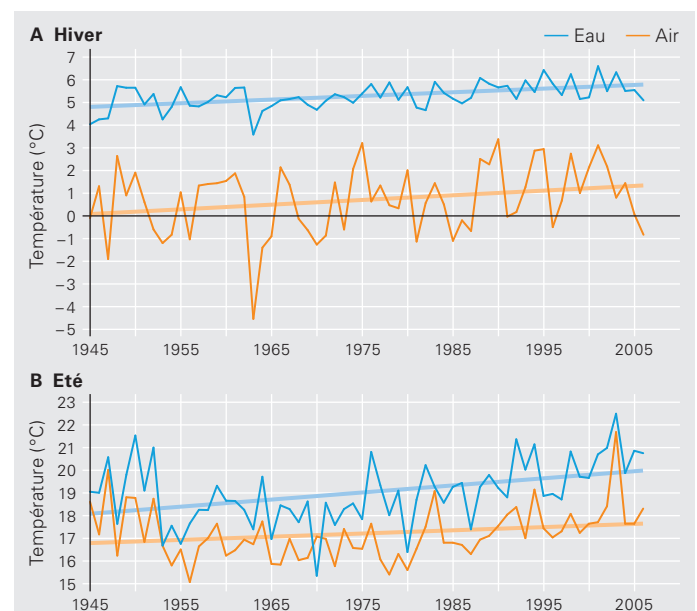
Une eau potable de bonne qualité est agréablement tempérée, dépourvue d'odeur, de goût et de couleur, et absolument irréprochable d'un point de vue hygiénique et toxicologique. Mais quelle est l'incidence du réchauffement climatique sur les ressources en eau et donc sur la qualité de l'eau potable ? Une tentative d'état des lieux.

Les eaux superficielles et souterraines, les neiges et les glaces sont les seules ressources d'eau douce disponibles sur la planète et sont donc essentielles à l'humanité. En même temps, elles font partie intégrante du cycle de l'eau et réagissent directement aux modifications du climat. Tandis que les effets du réchauffement climatique sur les aspects quantitatifs de l'hydrosphère occupent le devant de la scène – importance des précipitations, niveau des eaux dans les lacs et les nappes, régime d'écoulement des rivières – leur incidence sur la qualité des systèmes aquatiques et donc sur celle de l'eau potable qui en est issue est encore largement inconnue. En nous basant sur les discussions menées avec des experts nationaux et internationaux lors du colloque de l'Eawag tenu début 2008 sur « le climat et l'eau », nous allons tenter dans les paragraphes qui suivent de faire une synthèse des connaissances actuelles et nécessairement incomplètes sur le sujet, mais aussi de dresser un tableau des conséquences possibles des changements climatiques sur la qualité de l'eau destinée à la consommation. Dans ce contexte, nous considérons l'existence des changements climatiques comme une donnée objective et ne tenons pas uniquement compte pour nos réflexions des tendances à long terme, mais également des événements extrêmes comme la canicule de l'été 2003.

Des séries de données recueillies sur des décennies révèlent une augmentation continue de la température de l'eau des lacs. Divers modèles prédisent un réchauffement de l'air mais aussi des eaux suite à une augmentation des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre. Pour les lacs, cette prévision semble se confirmer si on en juge par les séries de données aujourd'hui disponibles sur l'évolution de la température des eaux au cours des dernières décennies. Ainsi, les lacs de Zurich (Fig. 1) [1], de Constance, de Garde, de Lugano et Majeur se sont réchauffés de façon continue à différentes profondeurs pendant cette période. Des observations similaires ont été faites sur d'autres lacs en Amérique, en Afrique, en Asie et en Antarctique [2].

Depuis 1945, les eaux du lac de Zurich mesurées à 5 m de profondeur se sont réchauffées en moyenne de 0,016 °C d'un hiver à l'autre (Fig. 1A) et même de 0,031 °C d'un été à l'autre (Fig. 1B). Pour la saison estivale comme hivernale, les fluctuations à court terme des températures de l'eau et de l'air sont étroitement corrélées (lignes en zigzag). En hiver, la progression à long terme de la température de l'eau suit celle de l'air (Fig. 1A) alors qu'en été, ce réchauffement est plus rapide dans l'eau que dans l'air sus-jacent (Fig. 1B). La situation est plus complexe dans les profondeurs du lac (Fig. 2). On y distingue nettement deux périodes en dent de scie (1985–1991 et 1999–2003) au cours desquelles un réchauf-

Fig. 1 : Evolution de la température de l'eau du lac de Zurich mesurée à 5 m de profondeur (représentative de l'épilimnion) de 1945 à 2008 comparée à celle de la température de l'air mesurée à Zurich pendant la même période. (A) Hiver (moyenne décembre – février), (B) Été (moyenne juin – août).





Michael Heidi, Oberweningen

Lac quasiment asséché au cours de l'été 2003. Sämtisersee, canton d'Appenzell Rhodes-Intérieures.

fement progressif de plusieurs années est abruptement interrompu par un refroidissement subit. De telles situations se produisent lorsque suite à une succession d'hivers doux, le brassage des eaux du lac ne se fait plus totalement [3]. Le faible réchauffement observé dans les eaux profondes suite aux changements climatiques (0,004 °C par an en moyenne sur une longue période) peut être considéré comme le résultat d'une multiplication de ces « dents de scie » et d'un accroissement de leur durée.

Le réchauffement des eaux des lacs favorise la prolifération des cyanobactéries. L'un des principaux facteurs responsables de la multiplication des cyanobactéries est le réchauffement de l'eau. Dans des conditions favorables, ces organismes également appelés algues bleues dans le langage courant, peuvent former des fleurs d'eau visibles à la surface de l'eau sous la forme de denses tapis de cellules. En plus de substances susceptibles de modifier l'odeur et le goût de l'eau, les cyanobactéries peuvent produire des cyanotoxines dont l'action peut être, selon les circonstances, plus ou moins dangereuse pour l'homme. Une espèce très connue des lacs suisses, *Planktothrix rubescens*, produit des toxines pouvant altérer la qualité de l'eau si elles s'y trouvent en concentration suffisante. Un réchauffement plus important des lacs pourrait favoriser des cyanobactéries encore plus toxiques, comme par exemple *Microcystis*, et par conséquent causer une dégradation massive de la qualité de l'eau.

Les eaux se mélangeront probablement moins fréquemment et moins fortement dans les lacs réchauffés. En plus du bilan thermique, le réchauffement climatique influera certainement aussi sur la répartition verticale de la chaleur dans la colonne d'eau et donc sur la stratification et le mélange des eaux des lacs. Certaines modélisations abondent dans ce sens [4]. De nombreux lacs suisses subissent un brassage caractéristique de leurs eaux en saison hivernale. Pour que ce phénomène se produise, il faut que la colonne d'eau présente une température uniforme sur toute sa hauteur (homothermie). A l'inverse, la stratification

thermique estivale (températures élevées en surface et faibles en profondeur = stagnation) empêche les échanges d'eau.

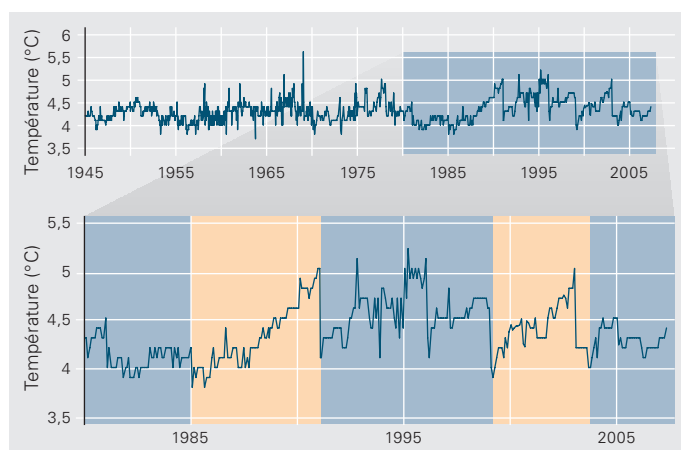
Sous l'effet des changements climatiques, les couches supérieures des lacs (épi et métalimnion) se réchaufferont sensiblement au cours des années qui viennent. Dans une première phase de transition tout au moins, la stratification thermique se trouvera stabilisée dans tous les grands lacs suisses. Ceci prolongera la stagnation estivale, raccourcira la phase d'homothermie et réduira donc la fréquence et l'intensité des phases de mélange [4]. Cette atténuation du brassage des eaux peut conduire à une réduction extrême des teneurs en oxygène en profondeur [5], ce qui par ailleurs ne devrait pas compromettre l'utilisation des lacs pour la production d'eau potable étant donné que la profondeur des prélèvements peut être modifiée selon les circonstances.

Pour les lacs habituellement couverts de glaces en hiver, c'est la situation inverse qui se présente : ils gèlent de plus en plus tard et leurs glaces fondent de plus en plus tôt, la durée de couverture par la glace se réduisant continuellement et le brassage s'intensifiant [6]. L'effet sur le degré d'oxygénation des eaux profondes est globalement positif.

Les cours d'eau aussi se réchauffent. En plus de celui des lacs, les prévisions font état d'un réchauffement à long terme des fleuves et rivières – une tendance déjà bien reconnaissable dans les séries de données pluridécennales dont nous disposons (Fig. 3) [7, 8]. Pendant la canicule de 2003 comme dans toutes les autres années sèches, les cours d'eau ont en outre vu leur niveau baisser dangereusement, ce qui, associé aux fortes températures de l'eau, a occasionné à certains endroits une mortalité massive des poissons [7].

Les fleuves et les grandes rivières jouent un rôle très important pour le refroidissement des usines et des centrales nucléaires. Si le réchauffement de ces eaux progresse, de surcroît en concomitance avec une réduction des débits, les installations vont connaître des problèmes de fonctionnement pouvant aller dans les cas extrêmes jusqu'à exiger une fermeture des centrales nucléaires concernées.

Fig. 2: Evolution de la température de l'eau du lac de Zurich mesurée à 120 m de profondeur (représentative de l'hypolimnion inférieur) de 1945 à 2008.



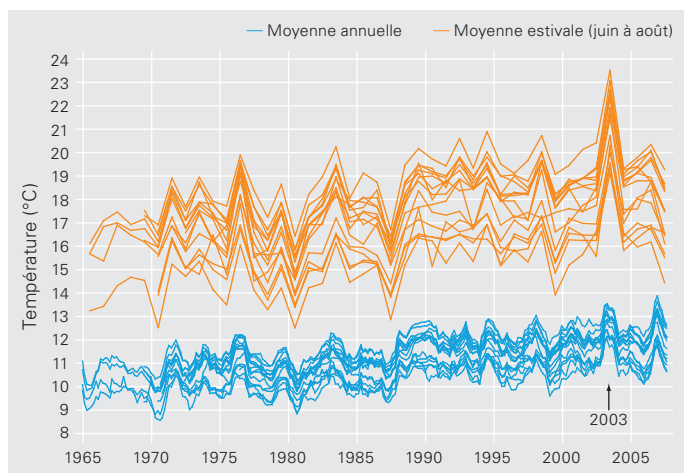
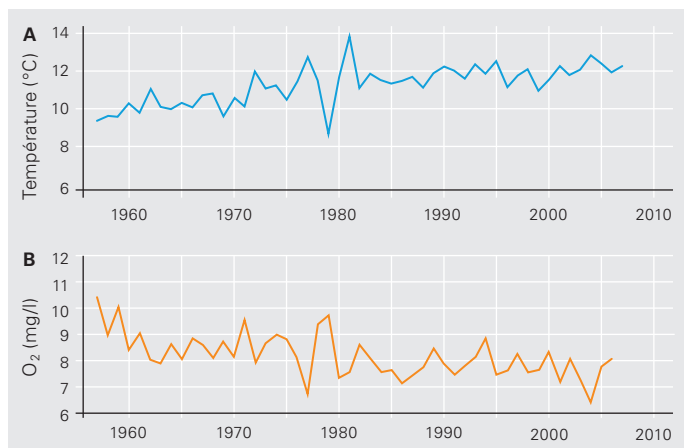


Fig. 3: Evolution de la température d'une sélection de cours d'eau suisses de 1965 à 2008 [7, 8].

Les effets des changements climatiques sur les cours d'eau sont encore mal cernés, en particulier dans leurs aspects géochimiques. Pourtant, les informations nécessaires à leur évaluation sont déjà disponibles grâce aux relevés effectués depuis 1972 par le réseau national de surveillance continue des cours d'eau suisses NADUF [9]. Ces données doivent être analysées au plus vite pour détecter rapidement les effets potentiels du réchauffement climatique.

Peu de données sur les effets des changements climatiques sur la qualité des eaux souterraines. Peu d'informations sont disponibles concernant les effets des changements climatiques sur les eaux souterraines. Les eaux anciennes qui séjournent dans le sous-sol pendant 10 000 à 1 millions d'années constituent certes des archives précieuses pour retracer l'évolution continentale du climat lors du passage des dernières glaciations au climat

Fig. 4: Evolution à long terme de la température (A) et de la teneur en oxygène (B) dans les eaux souterraines (captage de Rheinau, canton de Zurich). Données (moyennes de février) issues du travail de semestre de Julien Gendre.



chaud de l'holocène, mais on ignore tout ou presque de l'incidence passée et donc future des changements climatiques sur la qualité de l'eau.

Par contre, les effets sur les eaux souterraines jeunes (temps de séjour compris entre 1 et 1000 ans) sont mieux documentés, même si les informations sont d'un caractère plutôt anecdotique. Ainsi, une augmentation des teneurs en COD (carbone organique dissous) observée en Scandinavie dans les eaux destinées à la consommation [10] a été interprétée comme étant le signe d'une intensification du métabolisme du carbone dans le sol sous l'effet du réchauffement de l'atmosphère, les eaux entraînant davantage de COD lors de leur infiltration dans le sous-sol. Cette modification de la composition de l'eau peut affecter sa couleur, les composés humiques conférant par exemple une coloration brune. Par ailleurs, des teneurs accrues en COD peuvent affecter le bon déroulement des processus de production d'eau potable. Pour pouvoir garantir une bonne potabilisation des eaux, il peut alors s'avérer nécessaire d'inclure au traitement une élimination du COD.

Changements climatiques et recharge des nappes. On ignore si les eaux souterraines suisses sont également marquées par de telles modifications. Stimulé par les conclusions de son séminaire sur « le climat et l'eau » selon lesquelles la collecte et l'analyse de données de long terme (monitoring sur plusieurs décennies) seraient absolument essentielles pour la mise en évidence des effets des changements climatiques et environnementaux sur les ressources en eau, l'Eawag a entamé depuis peu dans toute la Suisse une recherche systématique de séries de données pluridécennales sur les eaux souterraines. Les premiers résultats sont encourageants et démontrent que certaines nappes d'eau présentent une réaction très nette et étonnamment forte à ces modifications environnementales. Ainsi, la température de l'eau souterraine pompée dans un captage installé en proximité de rivière à Rheinau a continuellement augmenté au cours des 60 dernières années (Fig. 4A) alors que sa teneur en oxygène diminuait (Fig. 4B). Paradoxalement, l'augmentation globale de la température de l'air ne peut, à elle seule, expliquer un accroissement des températures de l'eau beaucoup plus marqué en hiver qu'en été. Ce phénomène pourrait bien davantage refléter un décalage vers l'été de la période de renouvellement des eaux souterraines ou une modification fondamentale de la situation hydrologique (hydraulique, échanges entre nappe et rivière, etc.) ou les deux. D'autres régions sont également touchées, comme le Bassin parisien dont les nappes phréatiques ont connu une augmentation constante des températures au cours des 500 dernières années. Ne serait-ce qu'au XIX^e siècle, l'infiltration des eaux dans les nappes se faisait à une température moyenne annuelle plus faible qu'aujourd'hui.

Les extrêmes actuels, signes annonciateurs du futur – la canicule de l'été 2003. Alors que les changements à long terme restent assez abstraits pour l'opinion publique, les extrêmes climatiques ponctuels – crues, canicules, sécheresses – laissent souvent une empreinte durable dans la conscience collective.

En 2003, l'Europe centrale a connu l'été le plus chaud depuis le milieu du XIX^e siècle, c'est-à-dire le début des relevés météorologiques systématiques [11]. Les températures de l'air mesurées dans le nord de la Suisse ont dépassé la moyenne pluriannuelle de plus de 5 fois l'écart-type, c'est-à-dire de 5,4 °C. Aujourd'hui, de telles températures peuvent encore nous paraître exceptionnellement élevées, mais elles correspondent en fait aux températures estivales prévues par les modèles climatiques pour la période 2071 à 2100 [11]. Les conséquences de la canicule 2003 peuvent donc être utilisées comme référentiel pour les étés « normaux » attendus au cours de la prochaine décennie.

Aussi bien le lac de Zurich, assez pauvre en éléments nutritifs, que le Greifensee, moins profond et beaucoup plus riche, ont présenté en 2003 une très grande stabilité thermique du fait du fort réchauffement de leurs eaux de surface. De ce fait, la teneur en oxygène au fond du lac de Zurich a nettement chuté, à la différence du Greifensee dont l'hypolimnion est souvent anoxique en été [12].

Les masses d'eau souterraines ont, elles aussi, réagi à la sécheresse et à la chaleur de l'été 2003. Partout en Suisse, les niveaux des nappes ont atteint des minima parfois historiques et même les précipitations de l'année suivante pourtant normales n'ont pas suffi à combler le déficit apparu. Les aspects quantitatifs se sont cette fois-ci accompagnés d'une dégradation de la qualité de l'eau. Ainsi, l'état d'oxydoréduction des nappes les plus superficielles du canton de Thurgovie s'est modifié, entraînant une consommation totale de l'oxygène dissout (anoxie). A la suite de la canicule, les premières pluies ont soudainement lessivé les nitrates qui s'étaient accumulés dans les sols pendant la sécheresse. Cette vague de nitrates a contribué à la dégradation de la qualité des eaux souterraines et donc de l'alimentation en eau potable [7].

Les captages d'eau souterraine bordant la Limmat ont également été affectés par des problèmes de mauvaise oxygénation de l'eau. La recharge de la nappe se fait ici par infiltrations à partir de la rivière. L'arrivée par cette voie d'une eau relativement chaude a stimulé l'activité microbienne dans le fond du lit, provoquant une forte consommation de l'oxygène disponible dans le milieu et donc une altération de la qualité de l'eau brute. Il se trouve cependant que la plupart des usines de production d'eau potable actuelles ne sont pas adaptées au traitement des eaux peu oxygénées, voire anoxiques. En effet, dès que ces eaux remontent à la surface, elles se rechargent en oxygène et leur fer dissout précipite sous forme d'hydroxyde de fer. Ces particules de « rouille » demandent un traitement spécifique d'élimination avant distribution de l'eau pour la consommation.

Conclusion: l'Eawag intégrera de plus en plus les effets des changements climatiques sur la qualité des eaux dans ses recherches. La dynamique des eaux continentales est très sensible aux changements climatiques à long terme tout comme aux situations extrêmes qui préfigurent déjà la réalité de demain. Tandis que les effets du réchauffement climatique sur les lacs sont assez bien documentés et mécaniquement analysables, la recherche sur les eaux souterraines, principale ressource en eau

potable à l'échelle de la planète, n'en est qu'à ses débuts et doit donc être une priorité.

Malgré un nombre encore important de questions en suspens, nous pouvons déjà retenir deux points essentiels: les changements climatiques et environnementaux se produisent bel et bien et leurs effets sur les eaux et les ressources en eau potable sont d'ores et déjà mesurables. Ces faits doivent être pris en compte dans nos décisions actuelles si nous souhaitons mettre en place une gestion durable de la ressource en eau de façon à garantir pour les générations futures la pérennité de ce patrimoine essentiel. Il importe dans ce contexte de se préoccuper des aspects qualitatifs de la ressource tout autant que des questions quantitatives peut-être plus évidentes. En tant qu'institut de recherche de l'eau du domaine des EPF, l'Eawag entend fermement s'engager sur cette voie.



- [1] Livingstone D.M. (2003): Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. *Climatic Change* 57, 205–225.
- [2] Livingstone D.M. (2008): A change of climate provokes a change of paradigm: taking leave of two tacit assumptions about physical lake forcing. *International Review of Hydrobiology* 93 (4–5), 404–414.
- [3] Livingstone D.M. (1993): Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: a short-term climatic change indicator? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 25, 75–81.
- [4] Peeters F., Livingstone D.M., Goudsmit G.-H., Kipfer R., Forster R. (2002): Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography* 47, 186–197.
- [5] Rempfer J. (2007): An analysis of long-term historical deep-water oxygen concentrations in lakes of differing trophic status. *Diplomarbeit, Universität Bayreuth, Deutschland*.
- [6] Livingstone D.M. (2004): Eisbedeckung von Seen und Flüssen. *Klimatrends aus historischen Aufzeichnungen. Eawag News* 58, 19–22.
- [7] BUWAL, BWG, MeteoSchweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. *BUWAL, Bern, Schriftenreihe* 369, 174 S.
- [8] Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12, 10–26.
- [9] Hari R.E., Zobrist J. (2003): Trendanalyse der NADUF-Messresultate 1974 bis 1998. *Schriftenreihe der Eawag Nr. 17*, 200 S.
- [10] Hongve D., Riise G., Kristiansen J.F. (2004): Increased colour and organic acid concentrations in Norwegian forest lakes and drinking water: a result of increased precipitation? *Aquatic Sciences* 66, 231–238.
- [11] Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Haeberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332–336.
- [12] Jankowski T., Livingstone D.M., Forster R., Bührer H., Niederhauser P. (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lakes: implications for a warmer world. *Limnology and Oceanography* 51, 815–819.