

# Effets à distance des centrales hydroélectriques alpines sur les lacs et cours d'eau situés en aval

L'effet des centrales hydroélectriques alpines ne se limite pas aux cours d'eau sur lesquels elles sont installées mais concerne également des lacs, fleuves et rivières situés loin en aval de leur point d'implantation. Ainsi, par exemple, la charge des matières en suspension des cours d'eau à la sortie des réservoirs est réduite, ce qui se répercute sur le degré d'oxygénation des lacs en aval. Outre les matières en suspension, il s'avère d'autre part que les lacs de retenue piègent les nutriments. Il a ainsi été démontré qu'il existait un rapport entre le déclin des populations de saumon kokanee de la Columbia River au Canada et une baisse des concentrations de nutriments dans certains lacs suite à la construction de barrages en amont de ceux-ci. L'exploitation hydroélectrique affecte d'autre part le bilan thermique des cours d'eau situés en aval.

L'énergie hydraulique revêt une importance considérable au niveau de notre économie et de notre société en général. Avec une production de 38 TWh par an, dont 60% dans les Alpes, les centrales hydroélectriques suisses couvrent 58% des besoins en électricité du pays. On a assisté au cours des 50 dernières années à la construction de plus de 130 barrages. Totalisant un volume de 4 km<sup>3</sup>, ils sont en mesure de retenir près d'un quart de l'écoulement annuel de l'ensemble des bassins hydrographiques alpins (du Rhône, du Ticino, de l'Inn, du Rhin, de la Reuss et de l'Aar).

## L'exportation des déficits écologiques dans le bas-pays

Une exploitation aussi intensive des ressources ne saurait rester sans conséquences écologiques sur les cours d'eau

concernés (voir encadré). En plus d'effets pour la plupart bien connus et de caractère plutôt local observables dans les Alpes, la production hydroélectrique a des répercussions sur des fleuves, lacs et mers situés loin en aval [1]. La critique exercée dans le monde entier sur la production d'hydroélectricité [2] s'accompagne par conséquent de la demande explicite d'une évaluation plus différenciée de ces perturbations souvent négligées. La présente contribution se propose de dresser un tableau des déficits écologiques exportés avec le courant dans les zones de moindre altitude (voir également l'article de M. Fette, p. 21).

## Les barrages: des pièges à particules

Depuis la construction des quelques 50 barrages parsemés dans le bassin d'alimen-

## Influence des barrages sur les eaux de basse altitude dans un contexte global [2]

Les modifications indiquées *en italique* jouent un rôle important dans le cas d'exploitation hydroélectrique alpine.

### Hydrologie:

*Décalage saisonnier de l'hydrogramme, raréfaction des crues, marnage, débits résiduels, modification du niveau piézométrique, modifications de l'hydraulique propre aux lacs préalpins, perte d'eau.*

### Morphologie fluviale et bilan des solides:

*Rétention de matières en suspension, décalage dans le temps au niveau de la turbidité des eaux et du transport de particules et de nutriments, colmatage du fond, stagnation de la morphodynamique, érosion, recul des deltas et des côtes.*

### Cycles géochimiques:

*Production primaire, modification de la qualité de l'eau, autoépuration et rétention de nutriments dans les réservoirs, écoulement d'eaux anoxiques à partir des réservoirs, libération de substances et métaux réduits, émanations de méthane.*

### Ecologie des fleuves et zones alluviales:

*Modification de la composition des biocénoses, interruption du continuum fluvial, perte de zones humides inondées, de zones alluviales et de zones de transition entre milieux aquatiques et terrestres, apparition de nouveaux milieux humides au niveau de la racine des retenues.*

### Biologie des poissons:

*Entrave à la migration et fragmentation des populations, développement des espèces «lacustres» au détriment des espèces «fluviales», immersion des frayères, modification du régime thermique, détérioration de la qualité des habitats dans les soumis au marnage et aux débits résiduels, abcès (*Haemophilus piscium*), écoulement d'eaux anoxiques à partir des réservoirs.*

Lac/cours d'eau/station de mesure	Charge annuelle des matières en suspension <sup>1</sup> (Mt/an)	Teneur estivale moyenne des matières en suspension <sup>2</sup> (g/l)
Lac de Constance (Rhin, Diepoldsau)	3,6	0,91
Lac Léman (Rhône, Porte du Scex)	1,9	0,52
Lac de Brienz (Lütschine, Gsteig)	0,16	0,39
Walensee (Linth, Mollis)	0,11	0,18
Lac de Brienz(Aar, Brienzwiler)	0,11	0,14
Lac Majeur (Ticino, Bellinzona)	0,47	0,12
Urnersee (Reuss, Seedorf)	0,05	0,047

<sup>1</sup> Moyenne annuelle de 1979 à 1983 [SHGN, Berne] (matières en suspension mesurées tous les 14 jours).

<sup>2</sup> Concentration moyenne de la charge des matières en suspension en été (de juin à août).

Tab. 1: Déversement de matières en suspension dans les lacs suisses préalpins (source: OFEG/SHGN, Berne).

K. Ashley, Canada



Radeau portant des citernes d'engrais sur le Kootenay Lake qui bénéficie depuis 1992 d'apports de 50 t de phosphore par an [6].

tation du Rhône, la charge annuelle de matières en suspension du Lac Léman a diminué de moitié, passant à une valeur d'environ 1,5 millions de tonnes [3]. Etant donné que les besoins en électricité sont plus élevés en hiver, l'eau est en général stockée dans les retenues pendant plus de six mois avant d'être turbinée. Pendant cette longue période de stockage, une grande partie des particules en suspension se dépose au fond des lacs artificiels. La présence des barrages a également entraîné une nette raréfaction des crues du Rhône. Alors que le débit du fleuve excédait 500 m<sup>3</sup>/s 23 jours par an avant leur construction, cette fréquence n'est plus aujourd'hui que de 5 jours par an [3].

La diminution de la charge des matières en suspension et de la fréquence des crues induisent une modification des caractéristiques hydrauliques de la plupart des lacs préalpins suisses, situés à plus faible altitude. Ce phénomène s'explique par le fait que la densité des eaux fluviales dépend, outre de la température et de la teneur en matières dissoutes, surtout de la concentration des matières en suspension. Si cette dernière est supérieure à 0,5 g/l (Tab. 1), l'eau qui se déverse dans le lac est plus lourde que l'eau réceptrice et gagne les profondeurs. C'est en particulier le cas lors de crues d'orages à fortes charges de matières en suspension. S'en suit une augmentation de la teneur en oxygène des eaux profondes.

Ce phénomène peut d'une part se produire de façon directe, les eaux fluviales qui gagnent le fond y convoyant une grande quantité d'oxygène. Une expertise de l'EAWAG [4] a montré qu'en juillet 1994, des flux répétés d'eau fluviale de forte densité se sont accompagnés d'un apport de près de 4000 tonnes d'oxygène dans les profondeurs du lac de Brienz (Fig. 1A). Ceci s'est traduit par une forte augmentation de la teneur en oxygène notamment dans les zones les plus profondes (Fig. 1B). (A titre de comparaison: l'aération artificielle des lacs du Plateau suisse s'accompagne d'un apport d'oxygène inférieur à 500 tonnes par été).

D'un autre côté, l'eau fluviale dense est plus chaude que les eaux profondes du lac et son arrivée induit un léger réchauffement de ces zones (Fig. 1C). Ainsi, au cours des ans, les eaux profondes se réchauffent progressivement – ce réchauffement atteignant par exemple 1,5 °C dans le Lac Léman [5]. La stratification due au gradient de densité au sein des eaux profondes se trouve donc atténuée préparant le lac à un brassage total. Un mélange total ne peut se produire que tous les 5 à 10 ans et induit lui aussi

un apport d'eau riche en oxygène dans les profondeurs du lac.

Les brefs pics d'écoulement d'eau fortement chargée en particules qui se produisent lors des crues remplissent donc une fonction écologique importante pour l'ensemble des grands lacs préalpins suisses (Tab. 1). Les apports directs et indirects d'oxygène ont par le passé fortement contribué au fait que ces lacs (à l'exception du lac de Lugano) sont restés bien oxygénés même au cours de périodes de forts apports de nutriments. Une raréfaction des flux d'eau fluviale dense se traduit par une détérioration des conditions d'oxygénation des eaux profondes. Pour l'écologie des lacs, une diminution des pics d'écoulement chargé en particules est donc fort peu souhaitable.

### Les barrages piègent les substances nutritives

En plus des matières en suspension, les barrages retiennent une grande quantité de substances nutritives. Alors que cette propriété a des effets positifs dans le contexte d'eutrophisation qui règne en Suisse, elle peut s'avérer fort néfaste dans des régions plus pauvres en nutriments où elle peut entraîner des modifications de la flore et de la faune aquatiques. Ce problème est apparu dans toute son ampleur à la fin des années 80 lorsque les populations de l'étonnant saumon kokanee confiné aux eaux intérieures connut un déclin sans précédent dans le Kootenay Lake et dans les Arrow Lakes (Colombie Britannique, Canada) (Fig. 2). Ces lacs sont formés par la Kootenay River, et par la Columbia River, qui se trouve interrompue par deux grands barrages. Depuis leur construction, les deux lacs naturels reçoivent environ 50 t de phosphore en moins par an [6].

Aucune autre explication ne semblant plausible, on estima que la rétention de nutriments par les réservoirs était la cause la plus vraisemblable de la « crise du kokanee ». Le Kootenay Lake bénéficie donc depuis 1999 d'apports artificiels de 50 t de phosphore et de 200 t d'azote par an (voir photo). On ignore encore exactement à quel

point ces mesures prises d'urgence et souvent contestées sur le plan scientifique – on a notamment craint la disparition totale du saumon kokanee – ont été efficaces. Mais toujours est-il que le nombre des saumons kokanee à maturité sexuelle s'est stabilisé à sa valeur d'origine (Fig. 2) [6]. L'EAWAG s'est d'autre part penché sur la responsabilité éventuelle d'autres facteurs dans le déclin des populations de saumon kokanee [7]. Ces études ont montré que la construc-

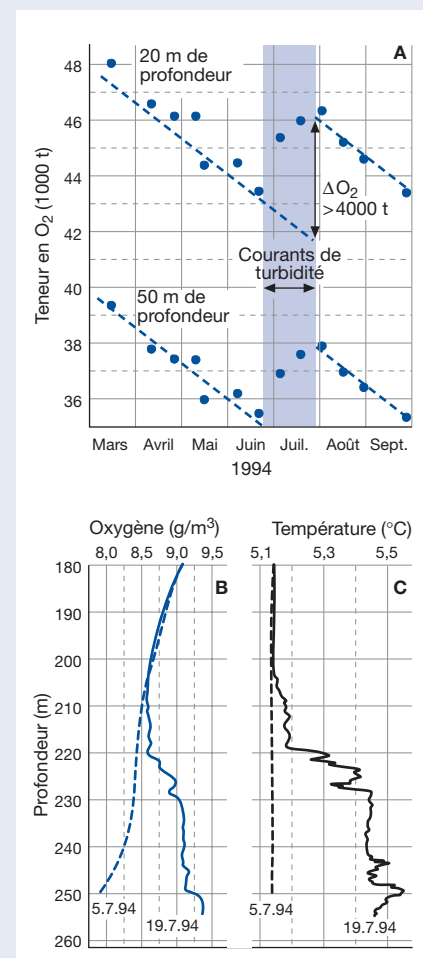


Fig. 1: Teneur en oxygène des eaux profondes du Lac de Brienz pendant l'été 1994: Au mois de juillet, suite à de forts orages, l'Aar et la Lütschine déversent dans le lac des flux répétés d'eaux chaudes, denses et fortement chargées en particules qui apportent en l'espace de quelques heures près de 4000 tonnes d'oxygène aux eaux profondes (A). Les apports d'oxygène (B) et de chaleur (C) se sont produits entre le 5 et le 19 juillet et se sont surtout fait sentir dans les 50 m les plus profonds.

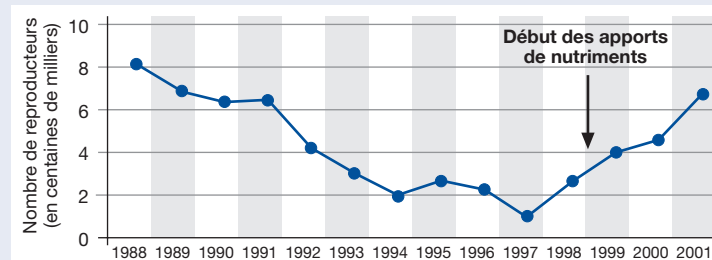


Fig. 2: Déclin et reprise de la population de saumon kokanee dans les Arrow Lakes [6].

tion d'un barrage sur les Arrow Lakes avait effectivement une influence majeure sur le lessivage de la biomasse et que la profondeur de la prise d'eau jouait un rôle décisif dans ce phénomène.

Dans certaines conditions, les substances nutritives dissoutes peuvent également être retenues de manière sélective dans les réservoirs. Si son temps de séjour est suffisamment long, la silice dissoute dans l'eau du lac peut par exemple être totalement absorbée par les diatomées [8]. Dans le Nord de la Suède, les fleuves de montagne issus de réservoirs apportent jusqu'à 60% de silice en moins à la Baltique que les fleuves dont les bassins d'alimentation sont exempts de barrages [9]. C'est pour cela que l'on craint une régression des diatomées de la Baltique au profit d'espèces indésirables, ce qui entraînerait une modification de la composition des communautés de zooplancton et de poissons. Un projet de l'EAWAG centré sur le barrage de «Protila de Fier» en Roumanie étudie actuellement un phénomène similaire dans le système fluvial «Danube/Mer Noire».

## Modulation de la température des fleuves par les barrages

En plus du bilan des matières en suspension et des substances nutritives des cours d'eau récepteurs, les centrales hydroélectriques ont un effet sur leur bilan thermique: Lors du turbinage des eaux, l'énergie potentielle est transformée en énergie électrique alors qu'en conditions naturelles, elle produirait un réchauffement de l'eau fluviale par friction. On assiste ainsi à un refroidissement du cours d'eau lors de la restitution de l'eau turbinée. On peut calculer que sur l'ensemble des Alpes suisses, ce phénomène est responsable d'un refroidissement moyen de 1,1 °C des fleuves alpins dont la température est déjà bien basse. C'est sur le Rhône que cet effet serait le plus sensible, sa température baissant de 1,6 °C.

Cette estimation ne permet cependant pas de décrire les variations saisonnières et journalières qui reflètent l'influence indirecte de divers facteurs. Une énorme quantité de chaleur est emmagasinée par la surface des lacs artificiels (env. 14 km<sup>2</sup> dans le bassin du Rhône) pendant l'été, ce réchauffement débordant en partie sur l'hiver. L'eau turbinée qui provient du fond des trois grands lacs de rétention présente ainsi pendant toute l'année une température presque constante comprise entre 4 et 5 °C. En hiver, l'eau tempérée des lacs provoque lors de leur restitution un réchauffement de 0,5 °C des eaux du Rhône basses en cette saison. En été, la rétention d'eau par les barrages limite l'écoulement et contribue au réchauffement des eaux du fleuve, notamment dans les tronçons du débit résiduel. Lors de la restitution ultérieure des eaux du barrage plus froides que celles du fleuve, celui-ci subit un brusque refroidissement, la chute de température pouvant atteindre plusieurs degrés centigrades (Fig. 3A + B).

Des études menées actuellement dans le cadre du projet de revitalisation Rhône/Thur (voir l'article de M. Fette, p. 21) sont consacrées aux effets de la production hydroélectrique sur le régime thermique du Rhône et sur la composition des biocénoses dans le fleuve.

## Problèmes suisses actuels

Les pêcheurs du lac préalpin de Brienz attirent depuis les années 80 l'attention sur les conséquences écologiques potentielles de la production hydroélectrique dans la région du Grimsel. Pour répondre à ces préoccupations, l'EAWAG a réalisé plusieurs études-conseil évaluant l'influence des barrages sur la turbidité perturbée du lac de Brienz [4]. Suite à une baisse dramatique des rapports de la pêche et d'un déclin inquiétant des populations de daphnies constatés en 1999 dans le lac de Brienz, le Canton de Berne décida de lancer une étude détaillée

du métabolisme écologique de ce lac et de ses modifications éventuelles. Cette étude est basée sur neuf hypothèses qui vont être testées au cours des années qui viennent dans le cadre de divers projets de recherche. L'EAWAG contribuera à ce projet de deux manières, d'une part en s'engageant dans le comité d'experts chargé d'accompagner les recherches et d'autre part en menant des travaux sur certains thèmes (poissons, production biologique, stratification des matières fines, etc.). Il sera encore difficile et laborieux de déterminer lequel des divers facteurs envisageables exerce à distance sur le lac de Brienz une influence décisive responsable des effets observés.

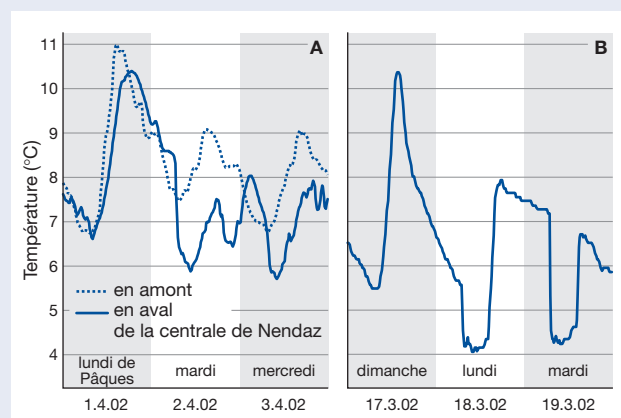


**Alfred Wüest, physicien, dirige la division «Ecologie aquatique appliquée» de l'EAWAG. Professeur titulaire de physique aquatique à l'EPF Zurich. Domaines de recherche: Processus de mélange et de transport dans les lacs et les réservoirs; Effets des activités humaines sur les cycles biogéochimiques dans les eaux.**

### Coauteurs:

Lorenz Moosmann, Gabriela Friedl

- [1] Friedl G., Wüest A. (2002): Disrupting biogeochemical cycles – consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64, 55–65.
- [2] World Commission of Dams (2000): Dams and development – a new framework for decision-making. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling VA, USA and World Commission of Dams, Cape Town, www.dams.org.
- [3] Loizeau J.-L., Dominik J. (2000): Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences* 62, 54–67.
- [4] Sturm M., Siegenthaler C., Suter H.P., Wüest A. (1996): Das Verhalten von Schwebstoffen im Brienzensee (Untersuchungsergebnisse der Jahre 1994–1995). EAWAG Auftrag Nr. 84 109, 102 S.
- [5] 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.
- [6] Ashley K., Thompson L.C., Sebastian D., Lasenby D.C., Smokorowski K.E., Andrusak H., (1999): Restoration of kokanee salmon in Kootenay Lake, a large intermountain lake, by controlled seasonal additions of nutrients. In: Murphy T., Munawar M. (eds.) *Aquatic Restoration in Canada*. Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, p. 127–170.
- [7] Matzinger A., Wüest A. (2001): The effect of cascading on nutrient pathways and productivity in dams – towards a sensitivity analysis. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*, ISEH, Tempe, Arizona, USA.
- [8] Humborg C., Conley D.J., Rahm L., Wulff F., Cociasu A., Ittekkott V. (2000): Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio* 29, 44–49.
- [9] Conley D.J., Stalnacke P., Pitkanen H., Wilander A. (2000): The transport and retention of dissolved silicate by rivers in Sweden and Finland. *Limnology and Oceanography* 45, 1850–1853.



**Fig. 3: (A) Evolution de la température des eaux du Rhône en amont (ligne pointillée) et en aval (ligne pleine) de la centrale de Nendaz du 1<sup>er</sup> au 3 avril 2002. Alors que le lundi de Pâques (centrale au repos), les eaux se réchauffèrent pour dépasser les 10 °C vers midi, elles furent les autres jours refroidies par les eaux de la Grande Dixence pour descendre à la même heure en dessous de 6 °C. (B) Evolution de la température des eaux de la Lonza (affluent du Rhône) en aval de la centrale de Löttschen du 17 au 19 mars 2002. Pour les mêmes raisons, la température varia de plus de 6 °C du dimanche au lundi.**