

Hydrosystèmes alpins – une diversité fragile en détresse

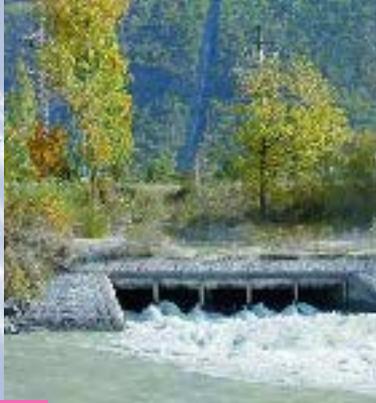
Les cours d'eau alpins:
Des écosystèmes variés et sensibles **9**



Effets à distance des centrales
hydroélectriques alpines **18**



Troisième correction du Rhône:
Revitalisation contre
l'exploitation hydroélectrique? **21**



Effets des changements climatiques
sur les hydrosystèmes alpins **24**



Hydrosystèmes alpins – une diversité fragile en détresse

2 Editorial: Les Alpes en mouvement

Article thématique

3 La richesse en eau des Alpes au centre de multiples enjeux

Recherches actuelles

7 La Convention alpine assure-t-elle la protection du château d'eau que sont les Alpes?

9 Les cours d'eau alpins: Des écosystèmes variés et sensibles

12 Les lacs alpins: Des écosystèmes extrêmes menacés par les phénomènes globaux

15 Les archives du fond des lacs de haute montagne

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

21 Troisième correction du Rhône: Une revitalisation du fleuve est-elle conciliable avec l'exploitation hydroélectrique?

24 Effets des changements climatiques sur les hydrosystèmes alpins

Divers

27 Publications (3158 – 3192)

28 Notes

Editeur Distribution et ©:
 EAWAG, Case postale 611, CH-8600 Dübendorf
 Tél. +41-1-823 55 11
 Fax +41-1-823 53 75
<http://www.eawag.ch>

Rédaction Martina Bauchrowitz, EAWAG

Traductions Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

Conseillère linguistique Sylvie Peter, EAWAG

Figures Y. Lehnhard et L. Zweifel, EAWAG

Copyright Reproduction possible après accord avec la rédaction.

Parution 3x par an en français, allemand et anglais. Production chinoise en coopération avec INFOTERRA China National Focal Point.

Crédit photographique R. Zah, EAWAG, A. Wüest, U. Uehlinger

Maquette inform, 8005 Zurich

Graphisme Peter Nadler, 8700 Küsnacht

Impression sur papier recyclé

Abonnements et changements d'adresse Les nouveaux abonné(e)s sont les bienvenu(e)s! Le bulletin d'inscription se trouve au milieu de ce numéro.

Les Alpes en mouvement



Bernhard Wehrli, chef de la division «Eaux de surface»

De nombreuses cartes postales et autres prospectus touristiques se parent de lacs de montagne solitaires et de torrents glaciaires turbulents. Cette vision idyllique des Alpes occulte en général le fait que les milieux alpins portent largement la marque de l'homme. Comme en témoigne le pollen retrouvé dans les sédiments des lacs alpins, les forêts de montagne sont défrichées depuis plus de 4000 ans pour céder la place à des pâturages. Etant donné la tendance actuelle des vallées alpines à devenir des axes de circulation européens, il devient de plus en plus urgent de protéger routes et habitations des crues et des laves torrentielles. Des seuils, barrages et digues contiennent aujourd'hui la fougue des rivières alpines. L'énergie hydraulique, l'or blanc des Alpes, est exploitée depuis plus de 100 ans. Rapportée à la superficie du pays, la production hydroélectrique suisse est aujourd'hui la plus importante du monde. De nombreuses rivières suisses sont dérivées à une altitude d'environ 2000 m vers des lacs de retenue en empruntant des conduites construites à cet effet. Dans les vallées, des panneaux de signalisation attirent l'attention des touristes et des randonneurs sur la montée subite du niveau des eaux lors de la mise en route des turbines par les centrales. Mais l'utilisation des carburants fossiles pour la production d'énergie a elle aussi une influence sur les systèmes et hydrosystèmes fluviaux alpins: Suite au réchauffement global du climat, le recul des glaciers est accéléré et la dynamique des précipitations et des débits est modifiée.

L'ONU a proclamé l'année 2002 comme Année internationale de la montagne. A cette occasion, l'EAWAG a consacré sa journée d'information annuelle au thème: «Hydrosystèmes alpins – une diversité fragile en détresse». Les contributions scientifiques présentent les derniers résultats de la recherche sur le fonctionnement des milieux aquatiques alpins et des organismes qu'ils abritent et livrent des informations sur les effets de modifications d'origine anthropique. Pour pouvoir appliquer les résultats

de recherche dans la pratique, une étroite collaboration entre les institutions concernées au niveau national et international est nécessaire. C'est justement parce que les Alpes constituent un obstacle important au transit entre le Nord et le Sud que l'on a vu très tôt se développer des échanges culturels intenses entre les différentes régions alpines. De cette tradition d'échanges est née au niveau politique la Convention alpine dont l'objectif principal est de favoriser le développement durable de cette région sensible située au cœur de l'Europe. Pour la gestion des eaux, cette orientation équivaut à favoriser la mise en place de modes de tourisme, de production hydroélectrique et de protection contre les crues compatibles avec une préservation à long terme de la valeur écologique et du bon fonctionnement de ces écosystèmes sensibles. Depuis environ un an, l'EAWAG, l'Institut Fédéral de Recherches sur la Forêt, la Neige et le Paysage (WSL), l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG) et divers instituts des EPF Zurich et Lausanne travaillent ensemble au projet «Rhône-Thur». Celui-ci vise l'élaboration de méthodes de revitalisation et de critères d'évaluation de l'efficacité de mesures engagées dans ce sens.

Le présent numéro est complété par le numéro 54 de l'EAWAG news entièrement consacré à l'écologie des cours d'eau alpins¹. Ces deux numéros font état de prises de vue momentanées plutôt que de comptes-rendus définitifs. Car tout comme l'environnement alpin, la recherche sur les écosystèmes aquatiques alpins est constamment en mouvement...



¹ On trouvera dans l'EAWAG news n° 54 un résumé de la contribution de Michael Monaghan.

La richesse en eau des Alpes au centre de multiples enjeux

Dans les Alpes, l'eau joue un rôle capital. Dans nos esprits, elle y est associée à une nature sauvage et à des écosystèmes sensibles et elle représente une ressource à usages multiples. Mais cette valeur tant naturelle qu'économique se voit menacée voire détruite par une exploitation trop peu diversifiée et trop intense. Les régions alpines sont donc amenées à gérer leurs ressources en eau dans une optique de durabilité. Mais cela ne pourra se faire sans une coordination au-delà des frontières des intérêts en jeu. En effet, le long des grandes rivières européens, des millions de personnes et toute une économie dépendent directement des ressources en eau des Alpes. Etant donné le réchauffement climatique qui nous attend, il sera de plus en plus important de collaborer au niveau international.

L'espace alpin suisse est riche en rivières et lacs et constitue le château d'eau d'une grande partie de l'Europe occidentale. Ses ressources en eau sont fortement exploitées pour des besoins de production hydro-électrique. De nombreuses rivières ont vu leur cours corrigé tant pour des raisons de sécurité (protection contre les dangers naturels) que pour livrer des surfaces exploitables par l'homme. Les intérêts économiques et de sécurité sont en partie incompatibles avec les besoins des écosystèmes aquatiques sensibles et avec une optique du paysage plus proche de la nature. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre les divers intérêts en jeu dans le but à la fois de préserver des richesses naturelles et de permettre une certaine exploitation des ressources. Pour ce faire, il est besoin de modes de gestion intervenant à plusieurs niveaux et élaborés sur une base scientifique solide.

Les Alpes: un espace de vie contrasté

Les Alpes couvrent une surface d'environ 190 000 km² répartis sur huit pays – la France, la principauté de Monaco, l'Italie, la Suisse, l'Allemagne, le Liechtenstein, l'Autriche et la Slovénie. La partie suisse des Alpes s'étend sur 25 000 km². Cette surface correspond à 60 % du territoire national. L'altitude la plus basse des Alpes suisses est de 193 m au Lago Maggiore, la plus

élevée de 4634 m au sommet de la Pointe Dufour. Cette région présente une énorme diversité climatique dans un espace des plus restreints: Des zones sèches du cœur des Alpes à celles de climat boréal, on y rencontre toute une série de climats intermédiaires sans compter les zones de climat méditerranéen. La moyenne annuelle des précipitations varie entre 500 et 4000 mm d'eau.

La grande variabilité des conditions naturelles, accompagnée de formes d'exploitation agricole souvent restées très respectueuses de l'environnement, est à l'origine d'une grande diversité de milieux naturels. Ce n'est pas un hasard si, en Suisse, la majorité des zones inventoriées pour leur grande biodiversité, les «hotspots», se trouvent dans l'espace alpin. Grâce aux nombreuses traces laissées dans les «archives de la nature», il est d'autre part possible de reconstituer l'histoire des Alpes depuis les dernières glaciations.

La densité de population des Alpes est dans l'ensemble plutôt faible. L'arc alpin compte au total près de 14 millions d'habitants. En Suisse, seuls 1,6 millions de personnes, soit 22 % de la population totale, vivent dans la région alpine [1]. Dans le canton des Grisons, la densité de population est particulièrement faible puisqu'elle est de 26 habitants au km², de nombreuses zones de haute montagne restant totalement inhabitées. Dans les fonds de vallées qui font l'ob-

jet d'une forte exploitation agricole, cette densité peut atteindre plus de 400 habitants au km². Ces zones fertiles abritent aussi de nombreux sites industriels et présentent un bon réseau routier et ferroviaire, aussi important pour le transit international.

L'agriculture, qui représentait il y a 100 ans le principal secteur d'activité de la plupart des régions alpines, a largement perdu en importance et la part des personnes qui en vivent ne constitue plus que quelques pour cent de la population active. Suivant l'altitude, ce sont les arbres fruitiers, les champs, les prés ou les pâturages qui dominent. De plus en plus de surfaces agricoles sont inexploitées, phénomène particulièrement répandu dans le Tessin, le Valais et les Grisons. A l'opposé, le secteur du tourisme et des loisirs s'est énormément développé et il fournit aujourd'hui entre 10 et 20 % des emplois des régions de montagne.

Le château d'eau

C'est dans les Alpes suisses que le Rhin et le Rhône prennent leur source, de même que l'Inn et le Ticino, affluents principaux du Danube et du Pô. La moyenne annuelle des précipitations y est d'environ 2000 mm d'eau. 1175 mm soit 28 km³ ou 900 m³/s s'écoulent dans les zones de plus basse altitude. 24 % des eaux que le Rhin déverse à son embouchure dans la Mer du Nord proviennent des Alpes suisses. Pour les autres rivières, cette part est de 1 à 10 % (Tab. 1). Sur de longs tronçons de rivière, l'écoulement en provenance des Alpes joue cependant un rôle quantitatif important.

Les Alpes constituent d'autre part une énorme réserve d'eau: ainsi près de 74 km³ sont stockés dans les glaciers suisses. En 1901, ce stock était encore de 95 km³ [2]. Dans les lacs naturels (en comptant les lacs du pourtour des Alpes et uniquement la part suisse des lacs limitrophes), sont emmagasinés quelque 100 km³ d'eau contre à peine 4 km³ dans les lacs artificiels. Une autre réserve d'eau, qui varie en fonction des saisons, est constituée par la neige. Des quantités difficilement quantifiables sont

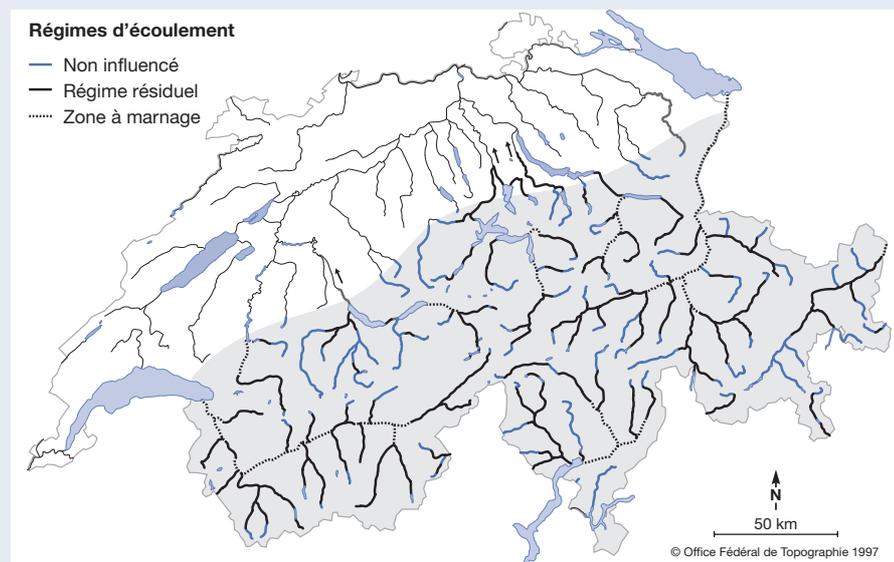


Fig. 1: Cours d'eau alpins touchés par l'exploitation hydroélectrique. Adapté de [14].

d'autre part stockées dans divers systèmes souterrains, dans les dépôts récents des vallées fluviales ainsi que dans les pores et fissures des roches.

L'abondance en eau marque les milieux naturels

La zone alpine suisse compte près de 30 000 km de cours d'eau, 17 lacs naturels et 47 lacs artificiels de surface supérieure à 0,5 km². A cela s'ajoute un nombre incalculable de petits lacs de montagne. Les glaciers suisses couvrent aujourd'hui une surface de 1300 km², soit environ 5% de la surface des Alpes suisses.

Les cours d'eau alpins ont de multiples formes: on rencontre de petits ruisseaux de source, des émissaires de lac assez tranquilles, des torrents rectilignes à forte pente, des systèmes ramifiés dans les plaines d'inondation, des cascades, des rivières glaciaires turbulentes ou calmes, mais souvent aussi des cours d'eau corrigés, canalisés et même parfois mis à sec. On distingue différents types de cours d'eau en fonction de l'origine de l'eau qui les alimente: fonte des glaces, pluies et fonte des neiges ou

sources. Les différentes formes de cours d'eau correspondent à autant d'habitats qui se distinguent par leurs caractéristiques hydrologiques, morphologiques et physico-chimiques. Des barrières climatiques et topographiques induisent la fragmentation de nombreux habitats et populations [3] (voir l'article de M. Hieber, p. 9).

Les lacs de haute montagne sont des écosystèmes de l'extrême soumis à des conditions climatiques particulièrement rudes et caractérisés par une grande pauvreté en substances nutritives et en sels minéraux. La pollution par des produits chimiques anthropogènes n'épargne malheureusement pas non plus ces lacs éloignés. Les polluants sont libérés dans l'atmosphère dans laquelle ils se répartissent et se redéposent également dans les zones alpines de haute altitude (voir l'article de R. Psenner, p. 12). Les grands lacs du pourtour des Alpes, le Lac Léman, le lac de Constance, le Lac des Quatre-Cantons, le Lac de Zoug, le Walensee, le Lac de Brienz, le Lac de Thoune, le Lago di Lugano et le Lago Maggiore, jouent un rôle prédominant d'un point de vue tant hydrologique que paysager.

Les cours d'eau alpins tout comme les lacs de haute montagne réagissent de manière très sensible aux changements climatiques et aux interventions humaines (voir l'article de M. Sturm, p. 15).

L'abondance en eau exploitée par l'homme

Dans les Alpes suisses, la forme dominante d'exploitation de l'eau est liée à la production hydroélectrique. Le potentiel exploitable est pratiquement utilisé à 100%. Près de 60% des besoins suisses en électricité sont couverts par la production hydroélectrique, en grande partie réalisée dans les Alpes. Mais l'eau est également utilisée pour alimenter en eau potable et industrielle les habitations, les centres touristiques et l'industrie de même qu'elle assure l'évacuation des eaux usées qui sont après traitement recueillies et transportées par les fleuves et rivières.

Une forme très traditionnelle d'exploitation de l'eau est l'irrigation des cultures qui est surtout pratiquée dans les zones sèches du cœur des Alpes. Cette vieille pratique est particulièrement bien illustrée par les systèmes d'irrigation bien connus du Valais qui sont parfois vieux de plusieurs siècles. L'eau y est captée à haute altitude et transportée jusqu'aux champs à irriguer au moyen de canalisations qui traversent les terrains les plus accidentés. Les canalisations du Valais ont une longueur de 1500 à 2000 km et irriguent une surface de 140 à 200 km² [4]. Une autre forme d'utilisation de l'eau, qui n'est plus pratiquée à l'heure actuelle mais qui le fut jusqu'au début du XX^e siècle, est le flottage des grumes. Cette pratique nécessita dans de nombreuses rivières des interventions hydrauliques tels que des retenues artificielles ou des ouvrages d'aménagement [4].

Au-delà de ces formes d'exploitation, l'eau est la source de nombreuses activités sportives, de loisirs et de détente. Les lacs et rivières contribuent à la richesse du paysage, à notre bien-être et éveillent souvent

Rivières des Alpes suisses	Cours d'eau principal	Embouchure	Ecoulement provenant		Part des Alpes suisses dans	
			des Alpes suisses	de tout le bassin	le bassin du fleuve principal	le débit annuel à l'embouchure
Bassin Rhin-Aar*	Rhin	Mer du Nord	1238 mm/an 530 m ³ /s	309 mm/an 2200 m ³ /s	6%	24%
Rhône	Rhône	Méditerranée	1100 mm/an 182 m ³ /s	611 mm/an 1900 m ³ /s	5%	10%
Bassin du Ticino**	Pô	Adriatique (Méditerranée)	1239 mm/an 134 m ³ /s	657 mm/an 1460 m ³ /s	5%	9%
Inn	Danube	Mer Noire	876 mm/an 54 m ³ /s	253 mm/an 6450 m ³ /s	0,2%	1%

* Rhin, Thur, Linth, Aar, Emme, Reuss, etc. / ** Ticino, Maggia, Tresa, etc.

Tab. 1: Importance hydrologique des Alpes suisses. Ecoulement en provenance de la partie suisse des Alpes [15].

en nous toutes sortes d'émotions. Des milieux naturels et aquatiques diversifiés et préservés sont très attractifs pour les activités de loisirs d'une région. Mais ces mêmes activités constituent une réelle contrainte pour ces milieux de plus en plus sollicités [5]. Inversement, l'eau ainsi que les lacs et rivières peuvent également être à l'origine d'inondations, de laves torrentielles et de glissements de terrain et constituer ainsi une menace pour l'homme.

Les usages de l'eau ne restent pas sans effets

L'exploitation hydroélectrique nécessite tout un système de centrales au fil de l'eau et de centrales à accumulation qui se complètent selon divers motifs [6]. Elle implique différentes mesures opérationnelles et structurelles à effets divers sur les cours d'eau (Tab. 2). On observe d'autre part une influence sur les rapports d'infiltration et d'exfiltration et donc sur le régime des eaux souterraines.

Les lacs de retenue reçoivent souvent des eaux provenant d'autres bassins versants. La dérivation des eaux est pratiquée aussi bien au sein d'un même bassin hydrographique qu'entre les bassins des grandes rivières. Par exemple, le Ticino reçoit des eaux des bassins du Rhin, de la Reuss (Aar) et du Rhône. Il existe aussi des dérivations au-delà des frontières. Ainsi, une quantité d'eau correspondant à 55 mm de précipitations est exportée du bassin versant de l'Inn vers l'Italie [2].

Dans les Alpes suisses, presque toutes les grandes rivières et une grande partie des cours d'eau de moindre importance sont concernés par les dérivations et les phénomènes de marnage (Fig. 1). Le fonctionnement des centrales à accumulation peut également produire un décalage des régimes d'écoulement de l'été vers l'hiver. C'est par exemple le cas dans le Rhône et le Rhin antérieur [2, 6].

Pour assurer la protection d'habitations contre les dangers naturels et pour gagner sur les rivières de précieuses terres agri-

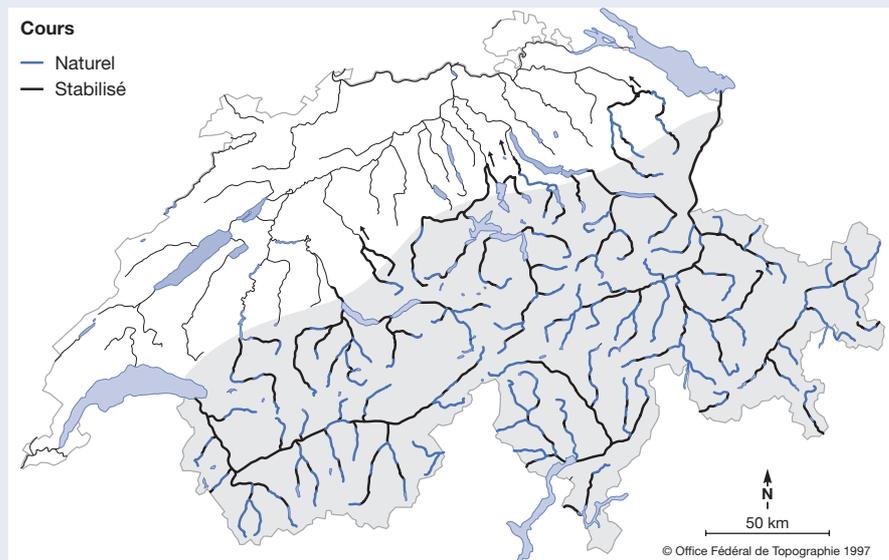


Fig. 2: Cours d'eau alpins au cours corrigé. Adapté de [14].

coles, de nombreux torrents ont dû subir des aménagements durs et une grande partie de leur cours est actuellement rectifié et endigué (Fig. 2).

Les mesures de correction des cours d'eau sont souvent accompagnées du drainage à grande échelle des terrains limitrophes. Il ne reste dans les Alpes suisses qu'une infime partie des zones alluviales autrefois répandues.

L'exploitation hydroélectrique et de correction des rivières peuvent avoir des répercussions sur des milieux situés loin en aval, modifiant les régimes d'écoulement, de transports solides, de nutriments et de température (voir l'article de A. Wüest, p. 18).

Incidence des changements climatiques

Le réchauffement global du climat impliquera une modification du régime des eaux dans le bassin hydrographique des grandes rivières. Les changements qui se produiront dans les Alpes se feront sentir tout au long du Rhin, de sa source à son embouchure dans la Mer du Nord et masqueront les effets régionaux [7]. La remontée de la limite des neiges éternelles, l'importance crois-

sante des crues hivernales, la baisse des écoulements estivaux, la dynamisation des écoulements, l'augmentation de l'évapotranspiration, la montée du niveau des mers et l'augmentation consécutive de la salinité des eaux souterraines proches des côtes de même que des changements au niveau de l'occupation du territoire par les habitations et les activités agricoles nécessitent une adaptation de la politique de gestion des eaux ainsi que de la pratique de toutes les activités liées à cette ressource (voir aussi l'article de B. Schädler, p. 24).

Conflits d'intérêts

Les divers intérêts liés aux multiples usages de l'eau au niveau local et régional sont plus ou moins divergents. Les perspectives d'exploitation hydroélectrique et de correction des rivières sont ainsi généralement en opposition avec celles de préservation des milieux naturels, de tourisme et de détente. Les intérêts des populations de plaine et de basse altitude sont également à prendre en considération. D'un côté, l'électricité et l'eau provenant de la zone alpine sont vitales pour la population et l'industrie. D'un autre côté, les activités de protection des

Conséquences physico-chimiques de l'exploitation hydroélectrique	Type de l'intervention humaine				
	Prélèvement d'eau	Dévasement (nettoyage du dispositif)	Restitution d'eau	Retenue d'eau	Constructions
Modification du régime d'écoulement	P	(P)	P		
Modification des caractéristiques de l'écoulement	S		S		P
Modification du régime des solides	S	P	S	P	(S)
Réduction de la taille et/ou altération des structures des habitats	S	S	S		P
Modification de la chimie et de la température de l'eau et des sédiments	S		S	P	

Tab. 2: Effets primaires (P) et secondaires (S) de l'exploitation hydroélectrique sur les cours d'eau. S résulte de P.

milieux naturels et les usages de l'eau concernant les lacs et les rivières de plaine et de basse altitude sont directement influencés par les problèmes qui se posent dans la zone alpine. Citons à titre d'exemple les activités de protection contre les inondations, de navigation fluviale et d'approvisionnement en eau potable.

La sensibilité des populations de plaine à l'égard de ces rapports amont-aval augmente, et ce, d'autant plus que les problèmes de réchauffement climatique se retrouvent au centre des débats. Une bonne gestion des eaux dans les Alpes devra de plus en plus souvent tenir compte des problèmes et attentes des régions de plaine. Mais les populations de plaine ont également une certaine responsabilité. Ainsi, plus une région de plaine gaspille ses ressources en eau, plus elle est contrainte d'en importer une certaine quantité, entre autres en provenance des Alpes [8]. Il apparaît donc clairement que les intérêts liés à l'eau sont en rapport les uns avec les autres, et ce, des sommets des Alpes à l'embouchure des fleuves.

Consignes pour la mise en œuvre de mesures

L'eau des Alpes sert à la nature comme aux hommes. Il est donc exclu d'en pratiquer une exploitation excessive et trop polarisée sur une seule activité qui mettrait en cause les valeurs naturelles des Alpes et qui se ferait au détriment des intérêts d'autres régions. Il est nécessaire d'agir à différents niveaux d'un point de vue spatial et politique – à l'échelle locale, régionale et internationale.

Les divers intérêts et problèmes doivent être analysés et évalués aux différents niveaux d'approche et considérés dans une perspective globale pour être intégrés dans les concepts de gestion des eaux. Pour que cela puisse se faire, il faut disposer d'un cadre politique clair dont les objectifs puissent être progressivement atteints par des mesures à appliquer aux différents niveaux considérés. Mais il est important que les consignes politiques laissent assez de champ libre aux différents acteurs impliqués et les incitent à prendre des initiatives cohérentes [9].

La Directive-cadre sur l'Eau de l'UE fournit un cadre juridique à une gestion globale des ressources en eau au niveau des grands bassins hydrographiques [10]. Elle ne suffit cependant pas pour garantir la préservation des inestimables ressources écologiques des Alpes. C'est la raison pour laquelle divers acteurs demandent l'adjonction d'un protocole relatif aux eaux à la Convention

alpine signée par les états alpins. Ce protocole doit permettre d'obtenir un équilibre entre les divers intérêts liés à l'eau en intégrant une dimension de durabilité dans les aspects de protection des milieux et d'exploitation des ressources (voir l'article de M. Broggi, p. 7).

Exemples d'actions et de mesures

L'élaboration d'un processus suisse pour la certification et la promotion d'une électricité produite selon un mode respectueux de l'environnement constitue un exemple réussi d'optimisation écologique de l'exploitation des ressources en eau réalisée en tenant compte des intérêts en jeu. Ce genre d'approche permet de combiner les aspects écologiques et les impératifs de production d'énergie pour aboutir à une solution bénéfique à tous les acteurs impliqués [11].

La troisième correction du Rhône qui va être réalisée dans le Valais tient compte dès le départ des multiples intérêts liés au fleuve. Ce projet accorde une importance égale aux impératifs de protection contre les inondations, aux objectifs d'amélioration de la qualité écologique et de l'attractivité touristique du fleuve et aux aspects socio-économiques (voir l'article de M. Fette, p. 21). Dans le cas du Rhône, le mode de fonctionnement et d'entretien des lacs de retenue a un rôle important à jouer. Une bonne gestion associée à des dispositifs de rétention visant une réduction du marnage peut fortement contribuer à une bonne protection contre les crues et à une atténuation des effets délétères au niveau écologique. D'une manière générale, l'optimisation écologique de la gestion des retenues fait partie des domaines d'action prioritaires de la politique future de gestion des eaux dans les Alpes.

La science mise à contribution

Les approches globales de gestion des ressources en eau nécessitent la contribution de divers acteurs: Des spécialistes de la chimie, de la physique, de la biologie, de l'hydrologie, des constructions hydrauliques, de l'économie, de la sociologie, mais aussi de l'économie énergétique et de la politique régionale, doivent collaborer avec les groupes d'intérêts impliqués pour dégager des solutions applicables et les réaliser en commun.

Evidemment, des actions sensées ne peuvent être entreprises sans l'appui de la science. D'un côté, il est besoin de connaissances de base sur l'écologie des lacs et cours d'eau alpins [12] et sur les effets d'at-

teintes directes et indirectes portées à ces systèmes. Ce numéro de l'EAWAG news présente des résultats sur ces thèmes de recherche. D'un autre côté, les scientifiques doivent aider à définir et à tester des modes de gestion de l'eau prenant en considération les impératifs politiques, juridiques, économiques, institutionnels, sociaux et culturels [13].

Les chercheurs doivent répondre à l'attente des gestionnaires en s'engageant tant au niveau scientifique que personnel pour un développement durable des ressources en eau des Alpes.



Ulrich Bundi fait partie de la direction de l'EAWAG et se consacre aux problèmes de gestion des eaux et de politique environnementale globale.

Je tiens à remercier Rudolf Koblet (EAWAG) pour sa contribution substantielle à la rédaction du manuscrit.

- [1] Broggi M.F., Staub R., Ruffini F.V. (1999): Grossflächige Schutzgebiete im Alpenraum – Daten, Fakten, Hintergründe. Europäische Akademie Bozen, Fachbereich Alpine Umwelt, 241 S.
- [2] Schädler B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Bundesamt für Umweltschutz – Landeshydrologie, Mitteilung Nr. 6, 9–83.
- [3] Monaghan M. (2003): Fragmentation des habitats et diversité génétique. EAWAG news 54f, 28–30.
- [4] Koblet R. (2000): Spiel mit dem Wasser – Spiel mit dem Feuer?, Selbstverlag, 70 S.
- [5] Office fédéral de la statistique (2002): Environnement Suisse 2002 – Statistiques et analyses, 322 p.
- [6] Forstenlechner E., Hütte M., Bundi U., Eichenberger E., Peter A., Zobrist J. (1997): Ökologische Aspekte der Wasserkraftnutzung im alpinen Raum. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 100 S.
- [7] Daamen K., Gellens D., Grabs W., Kwadijk J.C.J., Lang H., Middelkoop H., Parmet B.W.A.H., Schädler B., Schulla J., Wilke K. (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), 172 p.
- [8] Lehn H. (1998): Nachhaltiges Wassermanagement in Baden-Württemberg? Spektrum der Wissenschaft, April, 96–97.
- [9] Bundi U., Truffer B. (2001): La gestion intégrée des eaux: une approche pour l'avenir. EAWAG news 51f, 3–6.
- [10] European Community (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, L327/1–L327/72. http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index_en.html
- [11] Bratrich C. (2001): Protection des eaux et instruments de marché. EAWAG news 51f, 20–22.
- [12] EAWAG (2003): Cours d'eau alpins. EAWAG news 54f, 40 p.
- [13] EAWAG (2001): Evaluation et gestion des eaux. EAWAG news 51f, 32 p.
- [14] Service hydrologique et géologique national (1992): Atlas hydrologiques de la Suisse.
- [15] Koblet R. (2002): Communications personnelles.

La Convention alpine assure-t-elle la protection du château d'eau que sont les Alpes?

Les cours d'eau des Alpes sont menacés. L'espace laissé aux fleuves et rivières est bien souvent insuffisant, la qualité des eaux laisse à désirer et les débits résiduels sont généralement trop faibles. Etant donné l'importance des Alpes en tant que château d'eau de l'Europe, il est urgent d'intervenir. Dès 1991, les Etats alpins et l'Union Européenne ont signé une Convention sur la protection des Alpes. Dans le but de minimiser la menace pesant sur les cours d'eau et d'accentuer la sensibilisation de l'opinion à l'égard de la ressource essentielle qu'est l'eau, la Convention alpine doit se voir le plus rapidement possible compléter d'un protocole sur les eaux.

L'importance des Alpes en tant que château d'eau européen dans lequel le Rhin, le Rhône, la Drave, la Durance, l'Inn et le Pô prennent leur source est unanimement reconnue. Cependant, trop peu d'attention est encore accordée aux cours d'eau des Alpes. Sur les 30 000 km d'écoulement que compte le réseau hydrographique des Alpes suisses, 12 500 km sont constitués de rivières et fleuves plus ou moins fortement aménagés. Leur cours a été pour la plupart modifié au cours des 200 dernières années et ce pour différentes raisons, allant de la protection contre les crues à l'exploitation de l'énergie hydraulique. Si l'on souhaitait revitaliser tous les cours d'eau alpestres aménagés, il faudrait compter à la vitesse actuelle de revitalisation plus d'un millier d'années [1]. Il s'agit donc d'intervenir immédiatement pour assurer d'une part la protection des cours d'eau non aménagés et tenter d'autre part de rétablir les cours d'eau artificialisés dans un état proche de leur état naturel. Une telle action ne peut s'appuyer que sur des réglementations nationales et transfrontalières.

Le rôle varié des cours d'eau alpins

Dans la région alpine fortement influencée par les activités anthropiques et fragmentée par diverses constructions de génie civil (hydrauliques, immobilières, etc.), les eaux constituent le seul réseau naturel omniprésent et cohérent. D'un point de vue économique, les cours d'eau jouent un rôle

important pour la production d'énergie hydroélectrique, l'approvisionnement en eau potable et le tourisme. L'aspect esthétique des cours d'eau alpins joue un rôle primordial quant à leur valeur touristique, car leur beauté toute particulière attire de nombreux visiteurs.

Mais avec un débit annuel de plus de 200 milliards de m³, les cours d'eau n'ont pas un effet uniquement positif sur le milieu qui les environne. Ils représentent un danger potentiel considérable pour l'ensemble de l'espace riverain [2]. Les dévastations qu'ils ont causé dans différentes parties de l'Europe pendant l'été 2002 en sont bien les témoins (Fig. 1).

Menaces pesant actuellement sur les cours d'eau des Alpes

Les activités susceptibles de porter atteinte aux cours d'eau sont multiples et sont présentées brièvement ci-dessous:

■ *L'exploitation de l'énergie hydraulique* pose un problème ambivalent. Si au cours des 100 dernières années, les centrales hydroélectriques ont été appréciées car elles permettaient une production d'énergie «locale», «propre» et «renouvelable», leurs effets sur les équilibres écologiques se sont avérés plus néfastes qu'on ne le supposait il y a 50 ans. Ces installations jouent certes un rôle de premier plan dans le budget des communes de montagne, mais cet avantage économique demande un lourd tribut écologique (voir également les articles de A. Wüest, p. 18, et de M. Fette, p. 21).

■ La *vente* ou la *privatisation* de sources et cours d'eau constitue une nouvelle forme de menace. Assez peu d'attention est accordée à ce problème en Suisse étant donné que la plupart des eaux dépendent du secteur de l'approvisionnement en eau potable. Des sociétés multinationales comme Nestlé, Coca Cola ou Danone s'assurent la mainmise sur certaines eaux et confortent ainsi leur position sur le marché. On ne peut que spéculer sur les conséquences de cette nouvelle tendance sur la nature et le paysage.

■ Selon des sources non officielles, le nombre de bâtiments aurait triplé en Suisse entre 1951 et 1991. Les *zones habitées* et les *infrastructures routières et ferroviaires* envahissent de plus en plus le lit majeur des cours d'eau. La trop faible distance des constructions par rapport aux cours d'eau devient particulièrement visible lors des crues qui occasionnent des dégâts considérables dans un espace trop exigu (Fig. 1).

■ La *pollution des cours d'eau suite aux activités agricoles* reste un problème d'actualité. De plus, des études récentes ont montré que les eaux traitées rejetées par les stations d'épuration pouvaient contenir des traces de composés à effets hormonaux, appelés perturbateurs endocriniens. Ces substances interfèrent avec le système hor-



Fig. 1: Les dégâts visibles après le passage d'une crue importante.



W. Gerber, WSL

Fig. 2: Nombreux sont les cours d'eau de montagne autrefois opulents qui ne présentent aujourd'hui plus que des débits résiduels minimes, avec tous les inconvénients que cela comporte.

monal humain et animal à des concentrations extrêmement faibles.

■ Même si la loi suisse ne permet plus la *mise sous conduite* des cours d'eau, il faut garder à l'esprit qu'au cours des dernières décennies le réseau hydrographique suisse s'est vu privé de 50 km de cours d'eau naturels par an [3].

La Convention alpine va-t-elle assez loin?

La Convention sur la protection des Alpes a été signée en 1991 par les pays de l'arc alpin que sont l'Allemagne, la France, le Liechtenstein, l'Italie, Monaco, l'Autriche, la Suisse et la Slovénie ainsi que par l'Union Européenne. La Convention cadre, qui comprend les concepts fondamentaux de la stratégie de protection, est en vigueur depuis 1996. Ce document a le mérite de considérer les Alpes dans leur ensemble, en tant qu'espace de vie complexe et multiple, englobant 8 états et 8500 communes sur une surface de 190 000 km² et abritant près de 14 millions d'habitants [4, 5]. Le but de la Convention alpine et de ses protocoles (Tab. 1) est de placer les parties contrac-

Protocole	Signé par la Suisse
Aménagement du territoire et développement durable	16.10.1998
Protection de la nature et entretien des paysages	16.10.1998
Agriculture de montagne	16.10.1998
Forêts de montagne	16.10.1998
Protection des sols	16.10.1998
Tourisme et loisirs	16.10.1998
Energie	31.10.2000
Transports	31.10.2000
Règlement des différends	31.10.2000
«Protocole de Monaco»	20.12.1994

Tab. 1: Les 10 protocoles de la Convention alpine [4].

tantes dans l'obligation d'assurer «dans le respect des principes de précaution, du pollueur-payeur et de coopération» une politique globale de préservation et de protection des Alpes en utilisant avec discernement les ressources et en les exploitant de façon durable.

La Convention alpine traite également des cours d'eau alpins et de leur exploitation durable. Ainsi, la *Convention cadre* exige de façon explicite la conservation ou le rétablissement de la qualité naturelle des eaux et des hydrosystèmes. L'accent y est mis sur une bonne qualité des eaux, une construction des aménagements hydrauliques dans le respect de la nature des cours d'eau et une exploitation de l'énergie hydraulique respectueuse de l'environnement. D'autre part, le préambule du protocole sur la Protection de la nature et entretien des paysages insiste sur l'importance des cours d'eau pour la préservation de la biodiversité et même le protocole sur l'Énergie souligne leur rôle essentiel pour la diversité écologique, l'approvisionnement en eau potable et la production d'énergie.

Toutes ces dispositions ne sont cependant pas assez concrètes pour permettre une mise en œuvre efficace. Il reste encore à établir un protocole spécifiquement consacré aux eaux, document traitant des fonctions et besoins spécifiques des cours d'eau et désignant clairement les menaces susceptibles de peser sur eux.

Éléments devant figurer dans le Protocole sur les eaux

Il existe en Suisse un consensus sur les aspects devant être abordés par un tel Protocole sur les eaux [1, 6-9]:

■ **Conservation des cours d'eau naturels:** Les derniers restes des fleuves et rivières naturels doivent être placés sous protection intégrale. La vente spéculative de cours d'eau (pour l'eau potable) doit être interdite.

■ **Un espace de liberté suffisant pour les cours d'eau:** La condition *sine qua non* pour que les eaux des crues puissent s'écouler sans causer de dommages au milieu environnant, est que les cours d'eau disposent d'un espace de liberté suffisant. Il convient d'autre part de laisser suffisamment d'espace pour le bon fonctionnement et la connectivité d'écosystèmes adaptés au milieu. C'est uniquement sous ces conditions qu'une diversité structurale aquatique, amphibie et terrestre a une chance de s'installer. Il convient également de tenir compte du rôle récréatif des cours d'eau pour la population humaine. Pour éviter une pollution des eaux par les activités agricoles, il faut

de plus prévoir des zones tampon suffisamment larges à leur proximité.

■ **Un écoulement suffisant:** Il faut absolument trouver une solution équilibrée d'une part pour que les cours d'eau transportent suffisamment d'eau pour le maintien des milieux aquatiques et la préservation des paysages fluviaux et d'autre part pour que les débits résiduels soient assez élevés pour permettre un régime d'écoulement naturel et un transport de charge solide suffisant (Fig. 2).

■ **Une qualité des eaux suffisante:** La pollution des eaux par des composés solides et liquides doit absolument être réduite. Il est également primordial de veiller à ce que la température des eaux reste proche de ce qu'elle serait en conditions naturelles.

Etant donné que la nécessité d'un protocole sur les eaux n'a pas encore été reconnue au niveau politique, il est important d'agir. C'est uniquement lorsque cette demande sera devenue une réalité politique que les cours d'eau des Alpes pourront remplir dans l'avenir l'ensemble de leurs fonctions, si multiples soient-elles.



Mario F. Broggi, Ingénieur forestier (EPFZ), est directeur de l'Institut Fédéral de Recherche sur la Forêt, la Neige et le Paysage (WSL), privat-docent en écologie du paysage appliquée et protection de la nature à l'Université de Vienne et chargé de cours à l'Université de Bâle.

Il fut président de la CIPRA de 1983 à 1992.

[1] OFEFP (2002): Rapport de base «Paysage 2020». Etude non-publiée de l'OFEFP, Berne.

[2] CIPRA (1999): http://francais.cipra.org/texte_f/Publications/Info_52/CI52_Or_bleu.htm

[3] ODT et OFEFP (2001): Le paysage sous pression; Suite 2. EDMZ Berne, 50 pages.

[4] CIPRA (2002): <http://francais.cipra.org>

[5] Bätzing W. (2002): Evolution de la population dans les communes de l'espace alpin de 1871 à 2000. Supplément spécial, CIPRA-Info 65.

[6] Pro Natura (1998): Mehr Raum für unsere Fliessgewässer, ein Gewinn für Mensch und Natur. Beiträge zum Naturschutz in der Schweiz, pro natura Basel 19, 48 S.

[7] OFEG et OFEFP (2000): Réserver de l'espace pour les cours d'eau. Dépliant, Berne.

[8] OFEFP (2000): Leitbild Fliessgewässer Schweiz, projet interne.

[9] Rodewald R. (2001): Der Wasserschutz der Alpen im internationalen Kontext. Zusammenfassung des Referats, ANL-Fachtagung «Die Alpen – ein kostbares Wasserschloss», November 2001, Bad Reichenhall, non-publié.

Les cours d'eau alpins: Des écosystèmes variés et sensibles

Tout le monde les connaît, ces rivières de montagne qui gargouillent et ces torrents glaciaires qui déferlent, synonymes de beauté sauvage et de nature inviolée. Mais nos cours d'eau alpins sont-ils vraiment si intacts que cela? Etant donné la rudesse du milieu dans lequel ils évoluent et la difficulté de leur accès, ces écosystèmes et les organismes qu'ils abritent ont été jusqu'à présent assez peu étudiés. Un projet d'envergure lancé par l'EAWAG a pu montrer que les cours d'eau alpins constituaient une mosaïque d'habitats des plus variés et que la faune et la flore de ces milieux avaient développé toute une panoplie de stratégies des plus diverses pour s'adapter à des conditions environnementales souvent extrêmes. D'infimes modifications causées par des interventions d'origine anthropique et des changements climatiques sont déjà susceptibles de remettre définitivement en cause l'équilibre fragile de ces écosystèmes particulièrement sensibles.

On rencontre des cours d'eau alpins dans toutes les parties du monde, des pôles aux régions tropicales [1]. Ils se situent de manière caractéristique entre la limite supérieure de la forêt et la limite inférieure des neiges éternelles. Dans les Alpes européennes, cette zone s'étend à peu près de 2000 à 3500 m d'altitude. Les cours d'eau alpins peuvent comporter les habitats les plus divers dans un espace géographique très restreint, ces milieux étant généralement colonisés par des espèces très caractéristiques. Tous les types de cours d'eau alpins ont cependant certaines propriétés communes [2]:

- Ils sont soumis à des conditions climatiques extrêmes qui se traduisent p. ex. par des températures de l'eau très faibles et un rayonnement solaire important.
- Etant donné la longue durée et la sévérité des hivers, la saison de croissance des organismes est en général très courte et limitée à l'été dans la plupart des cours d'eau alpins; par contre, dans les rivières glaciaires, les périodes favorables à la croissance se situent au printemps et à l'automne, c'est-à-dire dans des laps de temps très brefs situés entre la disparition du manteau neigeux et le début de la fonte estivale des glaciers.
- Etant donné la faible abondance de la végétation riveraine, les apports externes

de matière organique aux cours d'eau sont très faibles, ce qui limite la quantité de nourriture disponible à la faune aquatique.

- La concentration en nutriments des cours d'eau alpins est en général très faible, ce qui limite la production primaire algale.
- Les régions alpines sont régulièrement soumises à des «perturbations» naturelles telles que les crues et les glissements de terrain.

Des sources calmes et des torrents glaciaires turbulents

On distingue 3 grands types de cours d'eau alpins en fonction des eaux qui les alimentent: les rivières **kryales** également nommées rivières glaciaires sont principale-

ment alimentées par des eaux de fonte des glaciers; les rivières **crénales** sont alimentées par des sources et dépendent des eaux souterraines; les rivières **rhithrales**, enfin, sont principalement alimentées par les eaux de pluie et de fonte des neiges [3]. L'origine des eaux a une influence décisive sur les conditions d'habitat de ces milieux (Tab. 1).

La fonte des glaces et des neiges qui se produit pendant une période assez courte de l'année est à l'origine de fortes fluctuations saisonnières de la plupart des conditions environnementales. Ainsi par exemple, le débit de la rivière glaciaire qu'est l'«Ova da Roseg» (Engadine, Suisse) passe de 0,2 m³/s à 30 m³/s au cours de la fonte estivale des glaces. Cette énorme augmentation de débit entraîne un remaniement important du lit de la rivière jusque là bien stable. Dans le même temps, ses eaux se chargent de farines glaciaires. Les eaux de fonte du glacier entraînent avec elles des particules solides extraites de celui-ci et les mélangent à l'eau claire de la rivière réceptrice dont la turbidité est fortement augmentée et qui prend alors un aspect laiteux [4]. Les rivières rhithrales sont soumises à des fluctuations saisonnières beaucoup moins prononcées et présentent donc des conditions environnementales plus modérées. Les cours d'eau issus de sources présentent quant à eux des conditions relativement stables et constantes puisque les

Type de chenal	Origine des eaux	Variabilité saisonnière	Stabilité du chenal	Température (°C)	Turbidité
Chenal principal (P)	kryale	forte	faible	0-4	élevée
Emissaire de lac (EL)	kryale	moyenne-forte	faible-moyenne	0-9	élevée
Chenal latéral (L)	kryale	forte-moyenne	faible-moyenne	0-4	élevée
Chenal connecté de façon intermittente (I)	kryale	forte	moyenne-faible	0-5	élevée-moyenne
Chenal mixte (X)	kryale-crénale	forte-moyenne	moyenne	0-5	moyenne
Affluent (A)	kryale-rhithrale	faible	élevée	0-8	limpide-moyenne
Chenal alimenté par les eaux souterraines (S)	crénale	faible	élevée	3-5	limpide

Tab. 1: Les différents types de chenaux des 11 premiers kilomètres de la rivière de Roseg (Engadine, CH) et leurs principales caractéristiques écologiques [2]. Voir également Fig. 1.



R. Zahn, EAWAG

Fig. 1: Les différents types de chenaux du Val Roseg (Engadine): P = chenal principal, EL = émissaire de lac, L = chenal latéral, I = chenal connecté de façon intermittente, X = chenal mixte, A = affluent, S = chenal alimenté par les eaux souterraines.

eaux souterraines les alimentent de façon régulière (Tab. 1) [5].

Les cours d'eau alpins: des écosystèmes variés

L'un des résultats les plus importants de notre projet de recherche a été de démontrer que les rivières de montagne n'étaient pas, et de loin, toutes semblables et que les cours d'eau alpins présentaient une hétérogénéité beaucoup plus élevée qu'on ne l'avait supposé jusque là. La présence d'une cascade ou d'un lac, l'existence ou l'absence de connexions entre les rivières, la position des cours d'eau par rapport aux pentes ou leur exposition sont autant de facteurs influant sur les conditions environnementales des cours d'eau alpins.

Les émissaires de lacs constituent p. ex. une zone de transition entre une masse d'eau stagnante et une eau courante. Le type d'habitat qui les caractérise est donc fortement influencé par les deux grands types d'écosystèmes voisins et se trouve donc colonisé aussi bien par des espèces lacustres que par des espèces fluviales [6]. Les plaines d'inondation sont quant à elles constituées d'une multitude d'habitats différents qui, suivant les écoulements, peuvent être isolés ou reliés entre eux et qui se modifient constamment sous l'influence des périodes de fonte des glaces et des neiges. Nos recherches rapportent ainsi l'existence de 7 types de chenaux différents sur les 11 premiers kilomètres de la rivière de Roseg (Fig. 1 et Tab. 1) [4]. La nature des connexions existant entre les différents types de chenaux varie en fonction des conditions d'écoulement qui évoluent au cours de l'année et qui influent également

sur la longueur du chevelu hydrographique de la plaine ainsi que sur l'origine des eaux qui l'alimentent: La longueur totale des chenaux est ainsi d'à peine 5 km en hiver pour s'étendre à plus de 20 km en été. En hiver, le chevelu hydrographique de la plaine est principalement influencé par les eaux souterraines et présente donc une certaine homogénéité alors que son régime se trouve en été dominé par les eaux de fonte des glaciers, ce qui se traduit par une hétérogénéité beaucoup plus importante [4].

La vie dans les milieux extrêmes

Comment les organismes aquatiques s'accommoient-ils de cette grande variété habitationnelle, de la grande hétérogénéité des conditions microstationnelles et du caractère parfois extrême des conditions environnementales auxquelles ils sont soumis? Dès le début du XX^e siècle, Steinmann [7] constatait que le torrent offrait à ses habitants un milieu si particulier que la forme et le mode de vie des animaux aquatiques devaient nécessairement en porter la marque. Mais les animaux ne sont pas les seuls à avoir développé des stratégies des plus diverses pour s'adapter aux conditions particulières des cours d'eau de montagne: c'est également le cas des algues et des végétaux supérieurs. La majeure partie des organismes aquatiques alpins sont benthiques, c'est-à-dire qu'ils évoluent en contact étroit avec le substrat. Ceci leur offre de meilleures chances de survie lorsque les vitesses d'écoulement sont particulièrement élevées. Parmi les adaptations aux forts courants, on peut citer les fortes griffes de nombreuses larves de pléco-

ptères, l'aplatissement dorso-ventral du corps de nombreuses larves d'éphémères (Ephemeroptères), les ventouses ventrales des larves de *Liponeura* (Blephariceridae), l'élaboration de fourreaux protecteurs à l'aide de divers matériaux (pierres, etc.) chez les larves de trichoptères, ou bien encore la production de couches protectrices gélatineuses chez de nombreuses algues.

Les communautés d'algues et invertébrés que l'on rencontre dans les cours d'eau sont généralement dominées par des familles de diatomées et par des ordres d'insectes bien caractéristiques. Les organismes peuplant les rivières kryales sont exposés à des conditions environnementales extrêmes et soumises à des fluctuations importantes. La singularité de ces milieux explique que la composition spécifique de leurs biocénoses est à peu près similaire dans toutes les parties du monde (cosmopolite) tout en présentant une amplitude limitée le long du cours d'eau («steno-zonal»). Par contre, les organismes des rivières rhithrales sont moins cosmopolites mais ont une aire de répartition plus étendue le long du cours d'eau («euryzonal») [3]. Les biocénoses des rivières glaciaires sont assez pauvres en comparaison des communautés rhithrales et crénales (Fig. 2). La présence d'un lac en amont a une influence variable sur les cours d'eau en fonction de l'origine des eaux: on observe ainsi beaucoup plus d'espèces dans les émissaires de lacs kryaux que dans les rivières kryales, mais moins dans les émissaires de lacs rhithraux que dans les rivières rhithrales. Les différents types de cours d'eau ne se distinguent pas uniquement par le nombre d'espèces qu'ils abritent mais également par la composition et la fréquence des divers taxons de leurs biocénoses. Les cours d'eau kryaux et rhithraux sont dominés par les insectes alors que les rivières plutôt stables et homogènes, c'est-à-dire les ruisseaux crénaux et les émissaires de lacs rhithraux, abritent également bon nombre de non-insectes, comme par exemple des oligochètes ainsi que des copépodes et des ostracodes benthiques (Fig. 2).

Les cours d'eau alpins: des écosystèmes sensibles

Comment les cours d'eau alpins réagissent-ils aux atteintes d'origine anthropique et aux changements climatiques globaux? Certains effets des interventions de l'homme sont facilement observables: certains aménagements structuraux hydrauliques mettent les rivières à sec, les barrages modifient les régimes d'écoulement (voir éga-

lement les articles de A. Wüest, p. 18, et de M. Fette, p. 21) et les mesures de protection contre les inondations forcent les rivières de montagne à s'écouler dans des chenaux consolidés et imperméables. Les conséquences des changements climatiques globaux sont par contre plus difficiles à évaluer. D'après les prévisions, il faut non seulement s'attendre à un réchauffement général de la surface de la terre mais également à une perturbation de la quantité et de la répartition des précipitations: celles-ci seront probablement plus fréquentes en hiver et moins abondantes en été (voir également l'article de B. Schädler, p. 24). Au cours des 150 dernières années, on a constaté un retrait général et progressif des glaciers du globe (Fig. 3) et les prévisions les plus pessimistes envisagent une disparition des glaciers de l'Engadine dans les 50 ans qui viennent [8].

Que signifient tous ces changements pour les organismes qui peuplent les cours d'eau alpins? Un retrait ou une disparition des glaciers implique la perte de conditions environnementales uniques dans leur genre – le régime d'écoulement des rivières passe d'un type glacio-nival (dominé par la fonte des glaces et des neiges) à un type nivopluvial (dominé par la fonte des neiges et les précipitations), les milieux extrêmes disparaissent et on assiste à une uniformisation des conditions environnementales. D'autre part, ceci permet à des espèces jusque là limitées aux zones fluviales situées plus en aval ou bien à des espèces exotiques de coloniser ces milieux auparavant inhospitaliers et d'évincer les espèces qui leur étaient adaptées. On assisterait alors à la disparition d'indicateurs spécifiques et d'espèces glaciaires puisqu'ils ne trouveraient pas de milieux plus élevés et plus froids pour leur servir de refuge.

des crues artificielles permet-il de maintenir une biocénose naturelle dans ces tronçons influencés [10]? Quelle stratégie de revitalisation convient-il d'adopter pour qu'un tronçon endigué soit recolonisé par une communauté naturelle (voir également l'article de M. Fette, p. 21)? Ces projets et bien d'autres laissent espérer qu'il restera possible dans l'avenir de succomber au charme des cours d'eau alpins.

Une gestion écologique des cours d'eau – une contradiction en soi?

Il semble évident qu'une gestion durable des cours d'eau n'est envisageable qu'à la condition de bien connaître les relations existant entre conditions du milieu et biotes. Il est donc d'une part indispensable de poursuivre les travaux de recherche fondamentale sur ces écosystèmes particuliers et d'autre part nécessaire de développer la recherche appliquée sur certaines questions spécifiques. L'EAWAG s'attache ainsi à répondre aux questions suivantes: Quel est le débit résiduel minimum permettant le rétablissement de conditions quasi-naturelles en aval des barrages [9]? Le recours à



Mäggi Hieber, biologiste, vient d'achever une thèse de doctorat sur les cours d'eau alpins, en particulier sur l'écologie des émissaires de lacs alpins, à la division «Limnologie» de l'EAWAG. Elle assure depuis la fonction de Chef de projet au Centre d'écologie appliquée de Schattweid.

Coauteurs:

Peter Burgherr, Urs Uehlinger, Klement Tockner

[1] Körner C. (1999): Alpine plant life. Springer-Verlag, Berlin, 338 p.
 [2] EAWAG (2003): Cours d'eau alpins. EAWAG news 54f, 40 p.
 [3] Ward J.V. (1994): Ecology of alpine streams. Freshwater Biology 32, 277–294.
 [4] Tockner K., Malard F., Burgherr P., Robinson C.T., Uehlinger U., Zah R., Ward J.V. (1997): Characterization of channel types in a glacial floodplain ecosystem (Val Roseg, Switzerland). Archiv für Hydrobiologie 140, 433–463.
 [5] Klein B., Tockner K. (2000): Biodiversity in spring-brooks of a glacial flood plain (Val Roseg, Switzerland). Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 27, 704–710.
 [6] Hieber M., Robinson C.T., Uehlinger U., Ward J.V. (2002): Are alpine lake outlets less harsh than other alpine streams? Archiv für Hydrobiologie 154, 199–223.
 [7] Steinmann, P. (1907): Die Tierwelt der Gebirgsbäche – eine faunistisch-biologische Studie. Annales de Biologie Lacustre 2, 30–162.
 [8] IPCC (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report, 944 p.
 [9] Meier W., Reichert P. (2001): Modélisation et protection des eaux. EAWAG news 51f, 13–15.
 [10] Robinson C.T., Uehlinger U., Monaghan M.T. (2003): La réponse des cours d'eau aux crues expérimentales. EAWAG news 54f, 31–33.

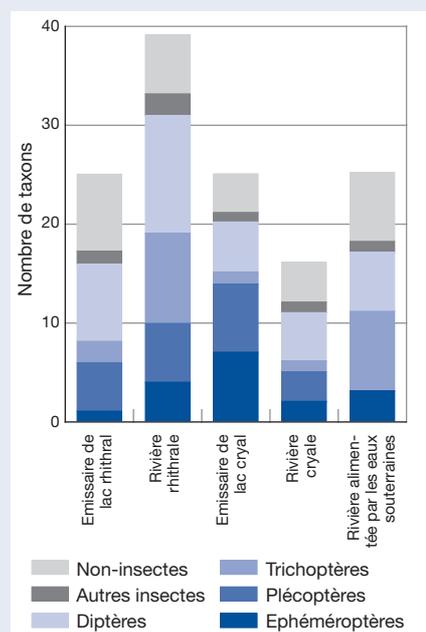


Fig. 2: Composition des zoobiocénoses dans différents types de cours d'eau alpins.

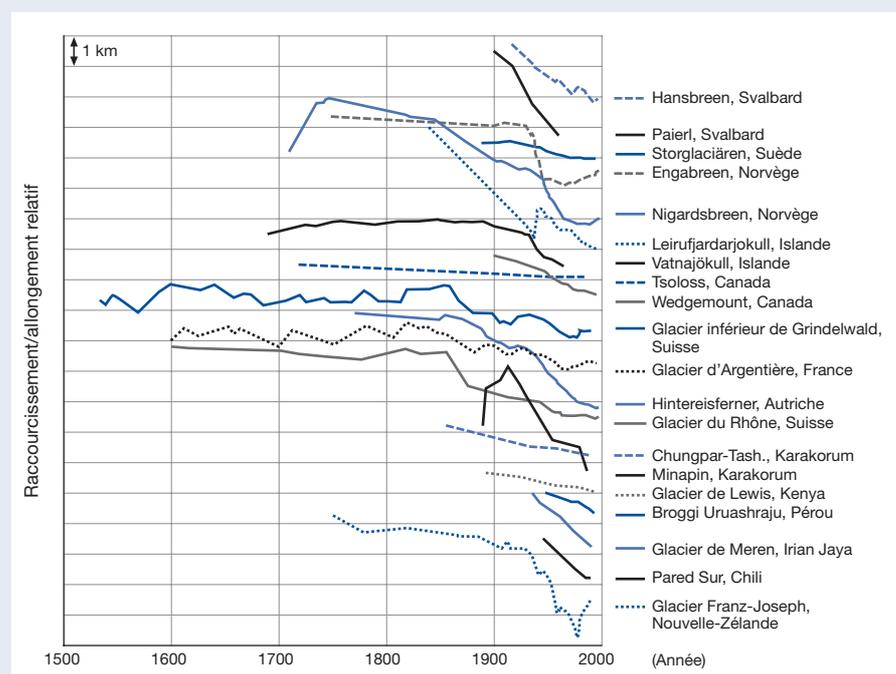


Fig. 3: Retrait des glaciers au cours des 500 dernières années [adapté de 8]. 1 unité = 1 km.

Les lacs alpins: Des écosystèmes extrêmes menacés par les phénomènes globaux

A cause du froid et de la pauvreté en nutriments, du fort rayonnement UV et de la longue obscurité, les lacs de haute montagne sont des habitats exceptionnels. Les organismes qui y vivent doivent développer des adaptations extraordinaires. Mais même ces lacs isolés ne sont plus intacts et les modifications causées par les activités anthropiques interfèrent avec les facteurs naturels et influencent l'écosystème. Étant donné que les lacs de haute montagne sont très sensibles à ces modifications, ils peuvent servir comme systèmes de préalerte. Actuellement on ignore encore en grande partie comment ces changements influenceront ces réserves retirées.

Les lacs alpins sont des écosystèmes extrêmes et on pourrait croire qu'ils soient inadaptés à la vie. Ils se caractérisent par des conditions extrêmement acides, basiques, chaudes ou froides ou par une salinité particulièrement faible ou élevée. Souvent ils doivent subir l'effet d'une forte pression ou d'un fort rayonnement (en particulier UV). Il se pourrait que les lacs alpins doivent résister en même temps à plusieurs situations extrêmes ou qu'au cours d'une année les conditions passent rapidement d'un extrême à l'autre.

En outre, les lacs alpins doivent subir de plus en plus les effets délétères d'une influence anthropique. Non seulement les changements climatiques jouent un rôle, mais également des substances organiques transportées par l'air dans ces régions isolées. Des organismes non indigènes introduits de manière volontaire ou accidentelle par l'homme posent un autre problème à

l'intégrité des lacs de haute montagne. Ces lacs réagissent de manière particulièrement sensible aux transformations de l'environnement (voir encadré) et se qualifient depuis les années 80 comme systèmes de pré-alerte.

Extrême de manière naturelle ...

La couche de neige recouvrant un lac alpin en hiver peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et peut le plonger dans une obscurité totale (Fig. 1). Dans le Gossenköllesee par exemple, un lac de 10 m de profondeur, elle occupe au moment de son extension maximale près d'un tiers du volume total du lac [1]. Sans lumière, une photosynthèse devient impossible et l'ensemble de la masse d'eau se transforme en un système hétérotrophe totalement isolé du monde extérieur pendant 6 à 8 mois de l'année. Seulement depuis quelque temps on sait que pendant cette période une com-

munauté particulière et pour la plupart microbienne se développe dans cette couverture hivernale. Ce milieu se compose non seulement d'éléments aquatiques mais aussi d'éléments terrestres et atmosphériques [2, 3].

Après la longue période d'obscurité hivernale, les lacs alpins se transforment rapidement en milieux très fortement éclairés par le rayonnement solaire. Ce passage se produit à la fin de juin ou au début juillet lorsque le rayonnement solaire atteint son intensité maximale et la couche de glace se brise. Plus l'altitude d'un lac est élevée, plus il est soumis aux ondes courtes UV (UVB, 280–320 nm). A 3000 m d'altitude, le rayonnement UVB est d'environ 50% plus élevé qu'au niveau de la mer. De plus, depuis 1970 le rayonnement UVB a augmenté environ de 10% en raison des modifications dans la stratosphère.

La faible teneur en acides humiques et en autres composés organiques permet au rayonnement UV de pénétrer jusqu'à une profondeur de 20 m (Fig. 2). Pour cette raison aucun organisme n'est protégé contre le rayonnement UV dans le lac lors de journées ensoleillées [4]. Une forme

L'hypothèse de base

L'état d'un lac dépend principalement de trois facteurs entretenant des relations hiérarchiques: le facteur n° 1 agit sur les facteurs n° 2 et n° 3, le facteur n° 2 agit sur le facteur n° 3 et le facteur n° 3 entraîne une expression spécifique des propriétés du lac concerné.

■ **Facteur n° 1: Le climat et les dépôts atmosphériques ...**

... conditionnent les gradients spatio-temporels des forces motrices.

■ **Facteur n° 2: La géologie, les sols et la végétation de son bassin versant ...**

... déterminent la sensibilité d'un lac à l'égard des influences extérieures.

■ **Facteur n° 3: La dynamique interne du lac (organismes, cycles de nutriments) ...**

... conditionne sa réponse individuelle aux perturbations.

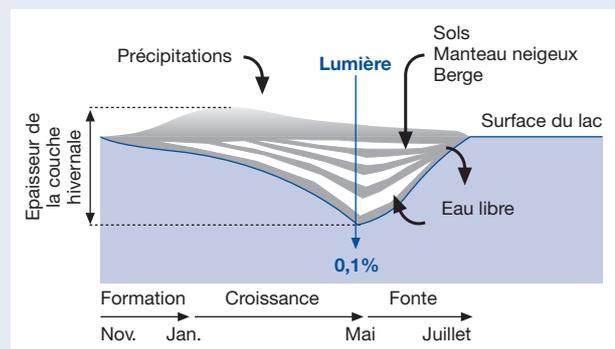


Fig. 1: Formation, constitution et fonte de la couche hivernale des lacs alpins. Sur une couche de glace transparente de quelques centimètres d'épaisseur se forme une structure en sandwich de plusieurs mètres d'épaisseur constituée de neige fondue (en blanc) et de glace glauque (en gris). L'origine et le transport des microorganismes sont indiqués par les flèches. Adapté de [3].



d'adaptation à cette situation extrême constitue par exemple l'accumulation d'acides aminés du type mycosporine dans certains petits crustacés [5]. Ces acides aminés sont absorbés par la consommation d'algues et retiennent les rayonnements UV dangereux dans le domaine de longueur d'onde 310–340 nm.

...mais pas extrêmement naturel

Les conditions extrêmes naturelles sont de plus en plus dominées par certaines activités anthropiques. Une des interventions les plus massives de l'homme dans les eaux naturelles est l'introduction d'«alien species» [6]. Ainsi, les lacs de haute montagne n'abritent normalement pas de poissons. S'ils sont tout de même empoisonnés, d'autres espèces peuvent se voir décimées, comme p. ex. certaines rares espèces de daphnies, et au pire des cas entraîner la destruction de l'écosystème. Mis à part le fait que les poissons ne sont pas adaptés à une vie dans des lacs particulièrement pauvres en nutriments et en sels minéraux [7]. Suite à un peuplement par des truites fario du Danube, une sous-espèce intéressante a curieusement survécu dans deux lacs de haute montagne autrichiens. Il y a plus de 500 ans que ces poissons furent lâchés sur l'initiative de l'empereur Maximilien I^{er} (Fig. 3).

De plus, les lacs alpins ne sont pas à l'abri de certains polluants, produits de notre civilisation moderne, tels que les polychlorobiphényles (PCB) ou le DDT et ses métabolites. Leur lieu d'utilisation ou d'émission importe peu étant donné que les polluants sont répartis dans l'atmosphère tout autour du globe [8]. L'endroit où ils se déposent dépend par contre de la température. Ainsi, les substances très volatiles comme les hexachlorobenzènes ne se déposent pratiquement que dans les régions polaires, alors que les composés peu volatiles comme le PCB 153, le PCB 180 et le DDT s'accumulent dans les zones froides des régions tempérées, soit par exemple dans les zones de haute altitude des Alpes. Les poissons provenant de lacs alpins contiennent ainsi jusqu'à 1000 fois plus de PCB (Fig. 4) et de DDT que ceux de moindre altitude [9].

Le réchauffement climatique et ses conséquences

On ignore encore comment les lacs alpins vont changer sous l'influence du réchauffement global [10]. En 1900, quand la température dans les Alpes était encore 2 °C de moins qu'aujourd'hui, et lors d'une période particulièrement froide autour de 1970, le Schwarzsee par exemple (Fig. 5) était gelé pendant toute l'année. Son bassin versant de très petite taille et ne s'élevant guère au-dessus de 3000 m était jusque dans les années 80 du XX^e siècle couvert de neiges éternelles. En outre, il y régnait probablement du permafrost. Depuis 1985, on assiste cependant à un fort réchauffement qui a déjà eu pour conséquence un dégel du lac de juillet à septembre et une fonte totale des névés à la fin de l'été. Le lac a fortement réagi à ces changements climatiques: le pH a montré une nette augmentation, la conductivité de l'eau et sa teneur en acide silicique dissous ont doublé. De plus, le Schwarzsee s'est réchauffé et a augmenté sa productivité, deux caractéristiques qui contrebalancent l'acidification des précipitations [11]. D'un côté, le ré-



Fig. 3: Illustration extraite des livres de chasses et de pêches de l'empereur Maximilien I^{er}. Vers 1500, il fit empoisonner de nombreux lacs de haute montagne du Tyrol avec des truites et des ombles.

chauffement climatique a ainsi contribué à une réduction des extrêmes. D'un autre côté, le rayonnement UV dans l'eau augmente suite à l'extension de la phase de dégel, une situation qui rend les conditions encore plus extrêmes pour les organismes du lac.

Les lacs de haute montagne en tant qu'indicateurs

Grâce à cinq propriétés particulières, les lacs de haute montagne sont des indicateurs de choix pour les transformations globales:

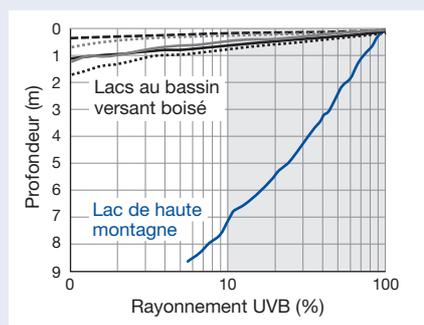


Fig. 2: Profondeur atteinte par le rayonnement UVB (longueur d'onde = 305 nm) dans des lacs à forte et à faible teneur en substances organiques dissoutes ou en acides humiques. Adapté de [4].

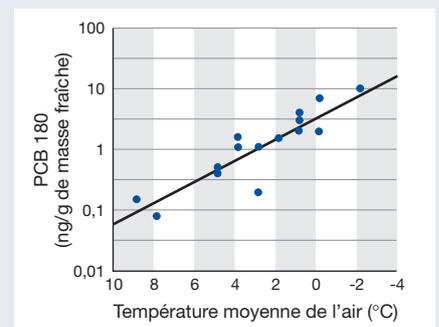


Fig. 4: Accumulation de polychlorobiphényle 180 (PCB 180) dans des poissons de différents lacs de haute montagne européens. La température moyenne de l'air présente un écart d'environ 10 °C entre les extrêmes, ce qui induit une accumulation 100 fois plus élevée. Adapté de [9].



R. Psenner, Université d'Innsbruck

Fig. 5: Il y a 100 ans que le Schwarzsee, situé à une altitude de presque 2800 m au-dessus de Sölden dans les Alpes de l'Ötztal en Autriche, était encore gelé pendant toute l'année.

Uniforme: On rencontre des lacs alpins sur toutes les latitudes, de l'équateur jusqu'aux pôles; ils sont comparables sur toute la planète et présentent des caractéristiques similaires.

Isolé: A moins d'être concernés par des aménagements locaux (routes, pistes, refuges, etc.), les lacs alpins se situent en général à bonne distance des communautés humaines et de leurs activités et sont influencés par des phénomènes globaux comme la pollution atmosphérique et le changement climatique.

Simple: Les lacs de haute montagne sont en général de petite taille et de faible profondeur, pauvre en espèces et disposent de réseaux trophiques simples, ce qui les rend plus facile à comprendre que d'autres écosystèmes.

Extrême: Les conditions physico-chimiques, telles que la température, le rayonnement UV, la couverture de glace et la pauvreté en nutriments, sont plus extrêmes que celles des lacs de moindre altitude; même des petites modifications des forces motrices mènent à des réactions mesurables.

Sensible: Étant donné leurs conditions extrêmes et leur forte réactivité, les lacs de haute montagne sont particulièrement menacés par les transformations globales.

Réduire au minimum les perturbations anthropiques

Malgré la complexité des rapports et l'incertitude quant au développement des conditions écologiques, nous pouvons résumer

nos connaissances concernant les lacs alpins en quelques phrases:

- Les lacs alpins sont à la fois extrêmes et extrêmement sensibles à certaines modifications anthropiques (et naturelles). Certaines perturbations, comme p.ex. une acidification et un réchauffement des eaux, se compensent mutuellement ou interfèrent quasi totalement avec d'autres phénomènes.

- Les conditions extrêmes ont entraîné des formes adaptatives intéressantes chez certains organismes. Certains d'entre eux vivent cependant à la limite de leurs possibilités.

- Les lacs alpins sont certes isolés mais pas intacts. Il n'existe pas de lacs de haute

montagne «naturels» au sens strict, ils sont tous concernés par des modifications globales. Tout de même les lacs alpins font partie des derniers écosystèmes proches de l'état naturel dans un monde modelé par l'homme.

- Il faut donc que toutes les perturbations d'origine anthropiques soient réduites à un minimum, qu'il s'agisse de modifications au niveau local («alien species», aménagements touristiques) ou global (émission de polluants et de gaz à effet de serre).

Au cours des deux dernières décennies, nous avons acquis beaucoup de connaissances sur les habitats extrêmes, sur les lacs alpins et sur les interrelations complexes qui régissent ces milieux – nous devons nous attendre à d'autres surprises et révélations.



Roland Psenner est professeur de limnologie à l'Université d'Innsbruck. Ses recherches portent notamment sur les lacs de haute montagne, sur les effets des changements globaux sur les bassins versants alpins, sur les cycles biogéochimiques de nutriments et de polluants ainsi que sur l'écologie microbienne de l'eau, de la glace et de la neige.

- [1] Psenner R., Sattler B. (1998): Microbial communities: Life at the freezing point. *Science* 280, 2073–2074.
- [2] Felip M., Sattler B., Psenner R., Catalan J. (1995): Highly active microbial communities in the snow and ice cover of high mountain lakes. *Applied and Environmental Microbiology* 61, 2394–2401.
- [3] Felip M., Wille A., Sattler B., Psenner R. (2002): Microbial communities in the winter cover and the water column of an alpine lake: system connectivity and uncoupling. *Aquatic Microbial Ecology* 29, 123–134.
- [4] Sommaruga R., Psenner R. (1997): Ultraviolet radiation in a high mountain lake of the Austrian Alps: Air and under-water measurements. *Photochemistry & Photobiology* 65, 957–963.
- [5] Sommaruga R., Garcia-Pichel F. (1999): UV-absorbing mycosporine-like compounds in planktonic and benthic organisms from a high-mountain lake. *Archiv für Hydrobiologie* 144, 255–269.
- [6] Schindler D.W., Parker B.R. (2002): Biological pollutants: Alien fishes in mountain lakes. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 2, 379–397.
- [7] Hofer R. (1998): Fische in alpinen Hochgebirgsseen: Ökotoxikologische und ökophysiologische Aspekte. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ichthyologie* 1, 59–73.
- [8] Carrera G., Fernandez P., Grimalt J.O., Ventura M., Camarero L., Catalan J., Nickus U., Thies H., Psenner R. (2002): Atmospheric deposition of organochlorine compounds to remote high mountain lakes of Europe. *Environmental Science & Technology* 36, 2581–2588.
- [9] Grimalt J.O., Fernandez P., Berdie L., Vilanova R., Catalan J., Psenner R., Hofer R., Appleby P.G., Rosseland B.O., Lien L., Massabuau J.C., Battarbee R.W. (2001): Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas. *Environmental Science & Technology* 35, 2690–2697.
- [10] Psenner R., Schmidt R. (1992): Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature* 356, 781–783.
- [11] Sommaruga-Wögrath S., Koinig K.A., Schmidt R., Sommaruga R., Tessadri R., Psenner R. (1997): Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* 386, 64–67.

Les archives du fond des lacs de haute montagne

A quoi ressemblaient les Alpes autrefois? Des hommes occupaient il y a déjà plus de 4000 ans les régions inhospitalières des Alpes suisses. La détérioration des conditions climatiques les a progressivement poussés à les abandonner. Mais dès qu'une amélioration s'est fait sentir, ils sont revenus sur ces terres. Les fluctuations de l'occupation humaine sont enregistrées dans les sédiments des lacs de montagne sous forme d'informations qu'il nous est aujourd'hui possible de déchiffrer. Ces archives permettent d'évaluer l'importance de l'influence anthropique par rapport aux changements climatiques naturels.

Les Alpes sont généralement appelées le «château d'eau de l'Europe». La préservation et la gestion dans une perspective de durabilité de cette ressource font partie des objectifs majeurs de la Convention sur la protection des Alpes (voir également l'article de M. Broggi, p. 7). La Convention alpine suppose que les zones de haute montagne n'ont pratiquement pas subi l'influence des activités anthropiques. Mais est-ce vraiment le cas? L'EAWAG s'est proposé de répondre à cette question. Sur la base des sédiments accumulés au fond des lacs de haute montagne, il est possible de retracer l'histoire vieille de plusieurs milliers d'années des lacs et de leurs bassins versants. Nous avons cherché à savoir d'une part, si les régions de montagne s'étaient modifiées et, si oui, depuis quand et dans quelle mesure et d'autre part, s'il était possible de distinguer les influences anthropiques des modifications naturelles.

Les archives d'un lointain passé en haute montagne?

Tant que l'on dispose de sources historiques ou de séries de mesures, il est possible de répondre directement à ce genre de questions. Ainsi par exemple, les changements survenus dans le canton des Grisons au niveau de l'aménagement du territoire peuvent être suivis grâce aux statistiques suisses de superficie (Tab. 1).

Si l'on souhaite par contre déterminer des changements survenus dans des temps bien plus reculés, on se heurte à de nombreuses difficultés. Il arrive bien souvent

que l'on ne dispose pas de séries de données pour la période étudiée ou bien que l'on manque de sources historiques fiables. Dans ces cas-là, on s'appuie sur des traces livrant indirectement des données utili-

sables qui se trouvent dans les «archives de la nature». Les sédiments lacustres constituent à l'heure actuelle une des archives les plus précieuses permettant de retracer l'évolution des conditions environnementales au cours des millénaires. Il est ainsi possible de déterminer sur une très longue période (10⁶ ans) les processus physiques et biogéochimiques qui se sont produits dans les lacs et leurs bassins versants, tout en les datant avec une grande exactitude (saison/année) [1]. Etant donné leur caractère écologique extrême, les lacs de haute montagne réagissent de manière plus sensible et plus rapide aux changements de l'environnement que les lacs de moindre altitude. C'est pour cette raison que dans

	% de la surface totale (en 1992/1997)		% d'évolution (depuis 1979/1985)	
	GR	CH	GR	CH
Forêt	26,7	30,8	+3,9	+1,9
«Surfaces non productives»	41,7	25,5	pas de données	
Terres agricoles	29,8	36,9	-3,1	-3,1
Surfaces habitées	1,8	6,8	+12,9	+13,3

Tab. 1: Statistiques de superficie dans le canton des Grisons (GR) et dans l'ensemble de la Suisse (CH); Office fédéral de la statistique (2002).



Fig. 1: Le Sägistalsee dans le canton de Berne, Suisse. Vue vers l'ouest. On distingue nettement les arêtes rocheuses de calcaires du jurassique supérieur et les cuvettes de marnes et schistes du crétacé inférieur [5].

M. Zeh, Laboratoire de la protection des eaux et du sol, Canton de Berne

les Alpes suisses, les chercheurs ont consacré toute une série de projets à l'étude de leurs archives sédimentaires [2-4].

Le Sägistalsee – un lac de haute montagne

Le Sägistalsee, situé à 1935 m d'altitude entre Grindelwald et le lac de Brienz dans l'Oberland bernois, est l'un des lacs de haute montagne qui ont déjà fait l'objet de recherches (Fig. 1). En 1996, dans le cadre du projet interdisciplinaire AQUAREAL financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique, une carotte de sédiments de 13,5 m de long a été prélevée au fond du lac. Cette carotte sédimentaire renferme 9000 ans d'histoire, c'est-à-dire presque tout l'holocène. Différents paramètres (Tab. 2) ont été étudiés couche après couche dans la carotte pour tenter d'élucider les rapports entre activités humaines et conditions climatiques passées.

Les changements climatiques naturels

Le réchauffement du climat qui marqua la fin de la dernière période glaciaire entraîna de forts apports de substances nutritives dans le Sägistalsee en provenance de son bassin versant et induisit il y a environ 6000 ans une augmentation considérable de la productivité biologique dans le lac (Fig. 2A). Cette même période est marquée par une forte activité de pédogenèse (Fig. 2B) et par un amoindrissement de l'érosion (Fig. 2C). Dans les eaux profondes du lac, la faible oxygénation (Fig. 2D) ne permet la survie

Indicateur mesuré	Condition environnementale passée décrite
Carbone organique (C _{org})	Production biologique dans le lac
Rapport calcite/quartz	Pédogenèse dans le bassin versant
Granulométrie moyenne	Erosion des roches dans le bassin versant
Rapport manganèse/fer (Mn/Fe)	Degré d'oxygénation des eaux profondes du lac
Larves de chironomides benthiques	Degré d'oxygénation des eaux profondes du lac
Pollen d'arbres, d'arbustes, et d'herbacées	Végétation du bassin versant
Débris de charbon de bois	Feux de forêt et activités humaines dans le bassin versant

Tab. 2: Paramètres environnementaux mesurés dans les sédiments du Sägistalsee et servant d'indicateurs de conditions passées.

que d'un petit nombre d'organismes à la limite eau/sédiments (Fig. 2E).

Au cours des 2000 ans qui suivent, c'est-à-dire jusqu'à il y a environ 4000 ans, les forêts se referment par l'arrivée du sapin (*Picea abies*) qui domine les peuplements autrefois plutôt clairsemés de pins et d'épicéas. Ce phénomène entraîne une stabilisation croissante des sols forestiers (Fig. 2B), une amélioration de l'alimentation en oxygène des eaux profondes du lac (Fig. 2D) et donc un développement accru des larves de chironomides dans les sédiments (Fig. 2E).

L'homme commence à modifier son environnement

Les traces les plus anciennes d'occupation humaine remontent à il y a environ 4000 ans. A cette époque du néolithique, les hommes de l'âge de bronze défrichent la forêt et utilisent les espaces dégagés comme pâturages. La présence accrue de pollens de graminées (Fig. 2F), l'apparition d'indica-

teurs de pâturages (Fig. 2G) et la multiplication des restes de charbon de bois (Fig. 2H) dans les sédiments témoignent de cette évolution. Dans les profondeurs du lac, la teneur en oxygène diminue brutalement et les chironomides disparaissent presque entièrement (Fig. 2D + E).

Ces premières atteintes de l'homme à son environnement se sont étendues sur plusieurs siècles et peuvent être constatées dans le bassin versant du Sägistalsee jusqu'à il y a environ 3500 ans. C'est à cette époque que les conditions climatiques se détériorent sur l'ensemble de la planète [6]. Les archives sédimentaires du Sägistalsee révèlent que dans les Alpes les hommes en ont également souffert. En l'espace de moins de 100 ans, les pâturages disparaissent du bassin d'alimentation du lac (Fig. 2G), les forêts s'étendent (Fig. 2F) et l'érosion s'accroît (Fig. 2B + C). Dans le lac même, la détérioration du climat induit une diminution sensible de la productivité biologique (Fig. 2A) et donc une augmen-

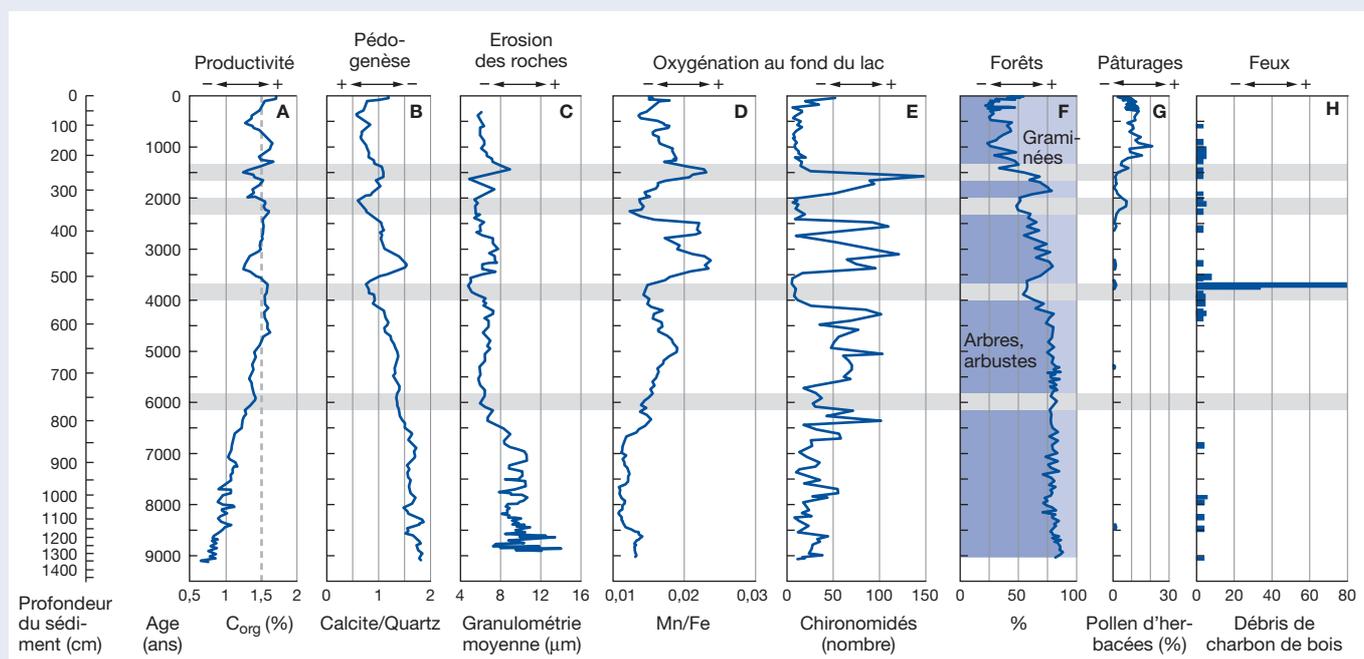


Fig. 2: Evolution au cours de l'holocène de divers paramètres de l'environnement (voir Tab. 2) dans une carotte sédimentaire issue du Sägistalsee [8-10]. Age = années datées au C¹⁴ à partir d'aujourd'hui. Les bandes grises indiquent des époques de changements importants.

tation de la teneur en oxygène des eaux profondes ainsi qu'un développement des organismes du fond (Fig. 2D + E).

Fluctuations de l'occupation humaine et de l'extension des forêts

Dans la suite de l'holocène, les signaux humains sont de plus en plus fréquents dans les sédiments du Sägistalsee et ils commencent à se superposer au signal climatique. Au cours de l'âge du fer, il y a environ 3000 ans, les conditions climatiques sont redevenues plus clémentes et ont permis une occupation humaine du bassin versant qui perdure encore de nos jours. Les arbres durent alors à nouveau céder la place à des prairies (Fig. 2F) et les alpages furent fortement utilisés, en particulier à l'époque romaine, il y a environ 2000 ans (Fig. 2G). Les eaux profondes du lac sont à nouveau peu oxygénées et sont donc moins propices au bon développement des organismes benthiques (Fig. 2D + E).

Au début du Moyen Âge, il y a environ 1500 ans, un changement du climat provoque un recul de l'occupation humaine dans la région. Les forêts regagnent du terrain (Fig. 2F), la stabilité des sols diminue (Fig. 2B) et, comme en témoigne la granulométrie plus grossière des sédiments, l'érosion s'accroît dans le bassin versant (Fig. 2C). Sur le fond bien oxygéné du lac (Fig. 2D) se développent alors de nombreuses larves de chironomidés (Fig. 2E).

Une nouvelle amélioration du climat qui s'amorce pendant le Haut Moyen Âge, il y a environ 1200 ans, rend le bassin versant à nouveau propice au pastoralisme et à l'agriculture qui s'étendent et se maintiennent jusqu'à nos jours sans même être interrompus pendant le Petit Âge Glaciaire (de

la moitié du XIII^e siècle à la moitié du XIX^e siècle).

Le Sägistalsee n'est pas un cas isolé

Les résultats du Sägistalsee montrent avec quelle sensibilité et à quelle vitesse les lacs de haute montagne réagissent à des changements climatiques de courte durée, comme par exemple la détérioration du climat survenue il y a 3500 ans. En même temps, ils montrent bien que même dans les régions reculées de haute montagne, l'occupation et l'utilisation de l'espace par l'homme remontent à bien plus loin que ce que l'on pensait jusqu'à présent, c'est-à-dire à plus de 4000 ans. Les activités humaines ont influencé de façon durable le lac et son bassin versant. Ces résultats sont-ils extrapolables à d'autres zones de montagne?

L'étude de carottes sédimentaires provenant des grands lacs de Haute-Engadine a montré que ces lacs situés à environ 1800 m d'altitude réagissaient eux aussi de manière très sensible aux changements d'ordre climatique. Là aussi, l'occupation et l'utilisation de l'espace par l'homme commencent très tôt, il y a également près de 4000 ans. Les sédiments portent eux aussi la trace des séquences alternées de défrichage et de progression de la forêt de même qu'ils trahissent la présence d'alpages [7].

Les zones de haute montagne sont-elles si reculées que cela?

La thèse selon laquelle les régions reculées de haute montagne et leurs lacs sont restés à l'abri des influences anthropiques ne peut être confirmée au vu de nos résultats. Même si au début, les modifications de l'environnement avaient une origine entièrement naturelle (climat), il est démontré que l'homme y contribue très tôt, il y a environ 4000 ans. Ainsi, pour ces régions alpines, «reculé» ne signifie en aucun cas «intact». Il n'en reste pas moins que les zones de haute montagne ont été par le passé moins touchées par les activités humaines que les zones très peuplées du bas-pays.

A l'heure actuelle cependant, les modifications de l'environnement sont de plus en plus nettement causées par l'homme. La figure 3 illustre bien cette tendance. En l'espace de quelques années, la région de St Moritz, au départ «reculée», a connu sous l'effet du tourisme un développement d'«urbanisation». On observe une évolution similaire dans différentes régions des Alpes. Et c'est justement parce que les zones de haute montagne réagissent de manière sensible et rapide aux modifications de l'envi-

ronnement que la forte pression humaine à laquelle elles sont soumises (circulation automobile, transit, création de pistes de ski, construction de centrales hydroélectriques, terrassements, etc.) induit des changements autrement plus importants que ne le feraient les variations naturelles des conditions climatiques. Les régions de haute montagne se trouvent donc perturbées à la fois par le réchauffement global du climat et par l'extension quasi exponentielle des activités anthropiques. Il est donc impératif que le respect de la «ressource Alpes», le «château d'eau de l'Europe», constitue une priorité dans les projets des états européens.



Michael Sturm est géologue et dirige l'équipe «Sédimentologie» de la division «Eaux de surface» de l'EAWAG. Spécialiste de paléolimnologie et de limnogéologie, il se consacre depuis plusieurs années à l'interprétation et l'identification des modifications de l'environnement

qui ont laissé leur trace dans les sédiments fluviaux et lacustres.

Coauteurs:

Thomas Kulbe, Christian Ohlendorf (maintenant à l'Université de Brême)

- [1] Sturm M., Lotter A.F. (1995): Sédiments lacustres: des archives révélatrices d'origine naturelle et anthropique. *EAWAG news* 38f, 6–9.
- [2] Lotter A.F., Pienitz R., Schmidt R. (1999): Diatoms as indicators of environmental change near Arctic alpine treeline. In: Stoermer E.F., Smol J.P. (eds.) *The Diatoms: Application for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press, 482 p.
- [3] Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M. (2000): Hagelseewil: a fascinating mountain lake – suitable for palaeoclimate studies? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27, 1013–1022.
- [4] Lanci L., Hirt A.M., Lotter A.F., Sturm M. (2001): A record of Holocene climate in the mineral magnetic record of Alpine lakes: Sägistalsee and Hinterburgsee. *Earth and Planetary Science Letters* 188, 29–44.
- [5] Guthruf J., Guthruf-Seiler K., Zeh M. (1999): Kleinsseen im Kanton Bern. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft, Kanton Bern.
- [6] Wick L., Lemcke G., Sturm M. (2002): Evidence of Late-glacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia: high-resolution pollen, charcoal, isotopic, and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *Holocene*, in press.
- [7] Gobet E., Hochuli P.A., Ariztegui D. (2001): Human impact on the vegetation of the Upper Engadine (Central Swiss Alps). *Conf. Int. Assoc. Sedimentology*, Davos.
- [8] Heiri O., Lotter A.F. (2002): 9000 years of chironomid population dynamics in an Alpine lake: long-term trends, sensitivity to disturbance and resilience of the fauna. *Journal of Paleolimnology*, in press.
- [9] Koinig K.A., Shotyik W., Lotter A.F., Ohlendorf C., Sturm M. (2002): 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in alpine lake sediments – The role of climate, vegetation and land use history. *Journal of Paleolimnology*, in press.
- [10] Ohlendorf C., Sturm M., Hausmann S. (2002): Natural environmental changes and human impact reflected in sediments of a high alpine lake in Switzerland. *Journal of Paleolimnology*, in press.

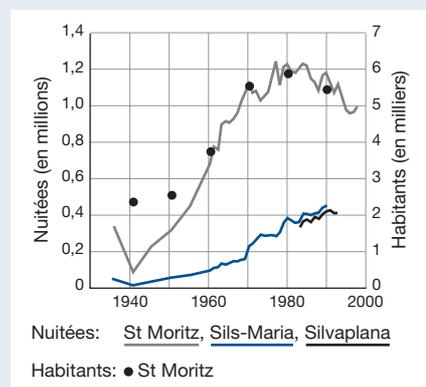


Fig. 3: Evolution de la population de St Moritz (points) et des nuitées de St Moritz (en gris) de Sils-Maria (en bleu foncé) et de Silvaplana (en noir) au cours des 60 dernières années. Source: Office du tourisme de St Moritz, de Sils-Maria et de Silvaplana.

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 km³, 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 ¹ (Mt/an)	Teneur estivale moyenne des matières en suspension ² (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

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

² 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 m³/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-

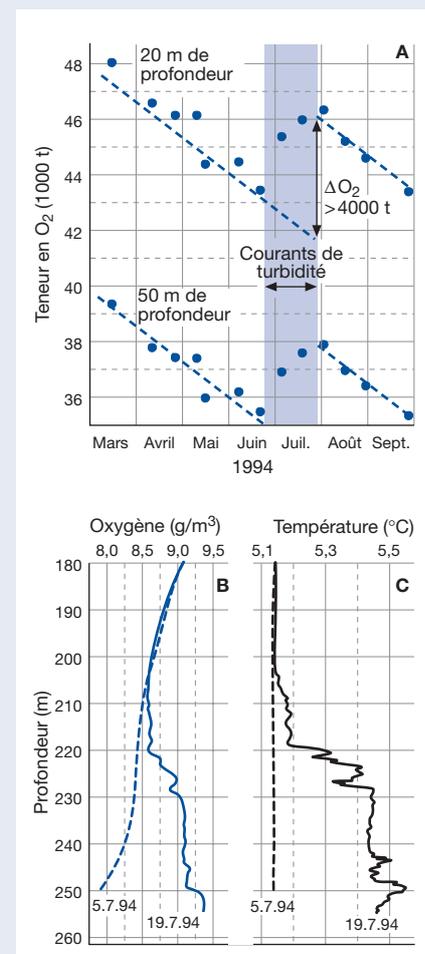


Fig. 1: Teneur en oxygène des eaux profondes du Lac de Brienz pendant l'été 1994: Au mois de juillet, suite à de forts orages, l'Aar et la Lütschine déversent dans le lac des flux répétés d'eaux chaudes, denses et fortement chargées en particules qui apportent en l'espace de quelques heures près de 4000 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.

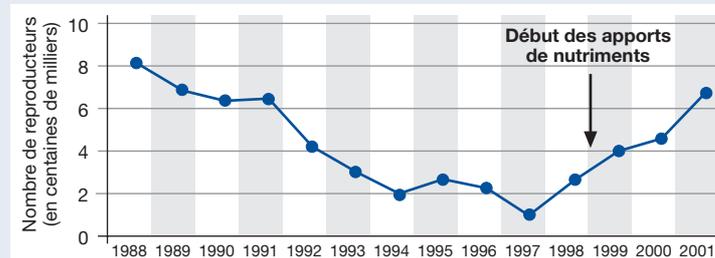


Fig. 2: Déclin et reprise de la population de saumon kokanee dans les Arrow Lakes [6].

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 km² 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.

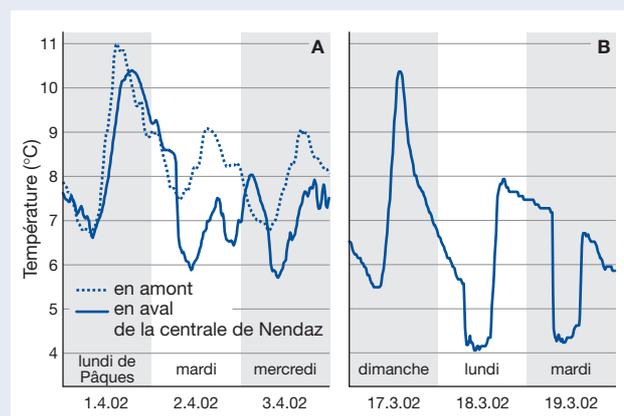


Fig. 3: (A) Evolution de la température des eaux du Rhône en amont (ligne pointillée) et en aval (ligne pleine) de la centrale de Nendaz du 1^{er} au 3 avril 2002. Alors que le lundi de Pâques (centrale au repos), les eaux se réchauffent pour dépasser les 10 °C vers midi, elles furent les autres jours 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.

Troisième correction du Rhône: Une revitalisation du fleuve est-elle conciliable avec l'exploitation hydroélectrique?

Contrairement à celles qui l'ont précédée, la troisième correction du Rhône actuellement en projet prévoit d'octroyer plus d'espace au fleuve. Il est envisagé de procéder à un élargissement du lit à divers endroits dans un double objectif de protection contre les crues et d'amélioration de la capacité écologique du Rhône. Les données du problème sont cependant autrement plus complexes aujourd'hui que par le passé: au cours des 50 dernières années, de nombreuses centrales hydroélectriques ont été construites dans le bassin versant alpin du Rhône qui sont à l'origine de fortes variations périodiques du niveau du fleuve. L'EAWAG a lancé une étude pour déterminer l'influence sur le niveau de la nappe alluviale du Rhône des élargissements prévus – et des variations perpétuelles de hauteur d'eau – ainsi que pour estimer les chances de voir s'installer une faune naturelle dans de telles conditions.

«On se représente sans peine l'attitude des hommes devant le fleuve: ses grandes crues assez fréquentes devaient leur donner l'impression que le Rhône est une force contre laquelle l'homme ne peut rien.» Pendant des siècles, les hommes de la Vallée du Rhône se sont sentis impuissants face à ses crues brutales et dévastatrices tant sur le plan humain que matériel [1]. Après la crue dramatique de 1860, on décida de procéder à des aménagements «rigides» du fleuve qui furent mis en œuvre dans le cadre de la première et de la deuxième correction du Rhône réalisées respectivement de 1863 à

1928 et de 1930 à 1960. Les crues qui se sont produites ces dernières années ont cependant mis à jour des problèmes non résolus qui sont à l'origine du projet de la troisième correction du Rhône.

La troisième correction du Rhône

Au temps de la première et de la deuxième correction du Rhône, les aménagements «rigides», ou mesures structurelles, occupaient une place de premier plan dans les stratégies de protection contre les inondations. Aujourd'hui, le principal souci de l'aménageur en charge d'un cours d'eau est d'élaborer une stratégie globale qui tienne compte à la fois des aspects socio-économiques et politiques et des aspects écologiques de la situation à traiter [2]. La troisième correction du Rhône compte par conséquent parmi ses objectifs outre une amélioration de la protection contre les inondations, un accroissement de la capacité écologique du fleuve. La renaturation du Rhône, au sens d'une «restauration du fleuve dans un état naturel ou du moins proche de l'état naturel» [3] restera cependant un rêve pieux. La troisième correction du Rhône prévoit bien davantage la revitalisation de certains tronçons choisis, qui comprendra par exemple un élargissement du lit rendant au fleuve l'espace qui lui est nécessaire pour remplir ses fonctions écologiques.

La 3^{ème} correction du Rhône

engendrera une dépense de l'ordre de 900 millions de francs répartis sur 30 ans. Elle poursuit les objectifs suivants:

- une sécurisation accrue par rapport aux inondations,
- un accroissement de la valeur écologique de l'espace fluvial,
- une plus grande attractivité du paysage fluvial.

Un projet de recherche interdisciplinaire traitant de questions spécifiques et impliquant également l'EAWAG accompagnera le projet cantonal, lui conférant ainsi une base scientifique solide. Une enquête en Suisse et à l'étranger permettra d'autre part de faire le point des connaissances pratiques acquises dans le cadre de projets similaires.

L'exploitation hydroélectrique apporte son lot de problèmes

De par sa topographie, le Valais se prête particulièrement bien à la production d'énergie hydroélectrique. Au cours du siècle dernier, plusieurs installations d'envergure y ont été construites, notamment la plus grande centrale hydroélectrique de la Suisse, celle de Cleuson-Dixence, dont la capacité équivaut à celle d'une centrale nucléaire. Les usines produisent en fonction de la demande et ne sont en général mises en service que pendant les périodes de pointe. Pour ce faire, de l'eau est prélevée dans les lacs haut-alpins et acheminée en conduite forcée jusqu'aux turbines de l'usine située à quelques centaines de mètres plus bas dans la vallée.

Le problème, c'est qu'après avoir livré sa force, l'eau est restituée au Rhône provoquant localement des variations momentanées de niveau. Ce phénomène connu sous le nom de marnage peut entraîner à certains endroits des fluctuations de niveau allant jusqu'à un mètre. Cette situation place les ingénieurs chargés de la planification de la troisième correction du Rhône devant des problèmes qui ne se limitent pas aux préoccupations d'ordre sécuritaire.

L'élargissement du lit des cours d'eau et ses conséquences

Les mesures de revitalisation envisagées vont entraîner un élargissement des rives qui pose diverses questions d'aménagement du territoire:

- Le déplacement de la digue tel qu'il est prévu dans le cadre des mesures de revita-

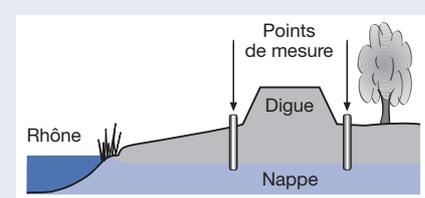


Fig. 1: Coupe transversale à travers le Rhône et sa digue indiquant les points d'observation de la nappe.

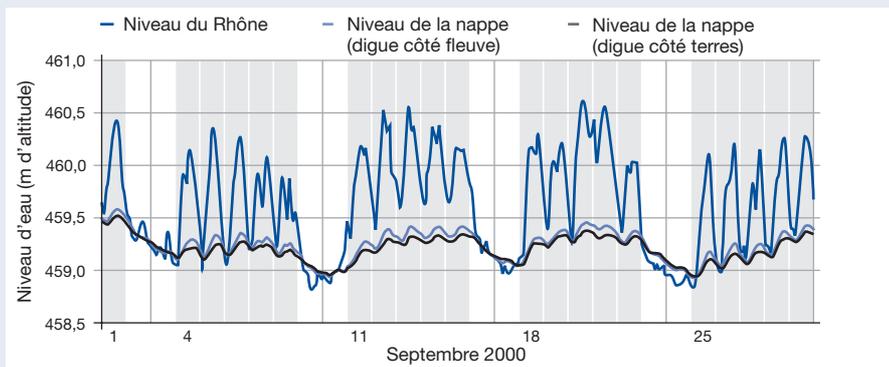


Fig. 2: Niveaux piézométriques au niveau de la digue de rive gauche du Rhône à hauteur de Martigny comparés au niveau du Rhône (Données brutes: Canton du Valais/Bureau BEG). Zones en gris: du lundi au vendredi; zones en blanc: samedi et dimanche.

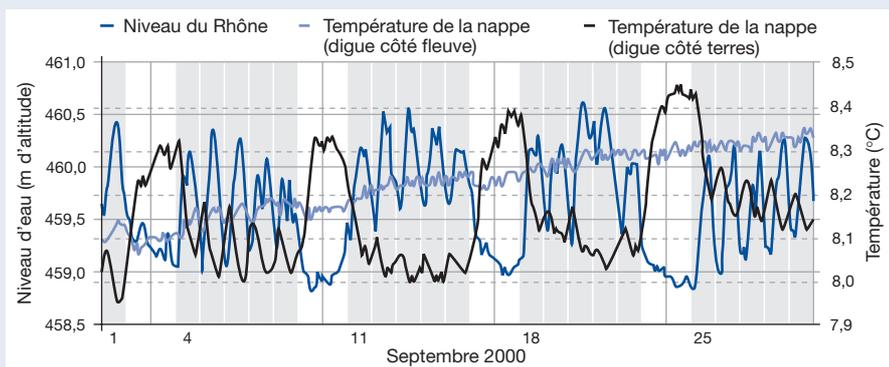


Fig. 3: Profils de température dans la nappe au niveau de la digue de rive gauche du Rhône à hauteur de Martigny (Données brutes: Canton du Valais/Bureau BEG). Zones en gris: du lundi au vendredi; zones en blanc: samedi et dimanche.

lisation entraînera-t-il des modifications du niveau piézométrique de la nappe?

■ Quelle sera l'influence du marnage consécutif sur l'équilibre écologique des tronçons restaurés?

Ces aspects font actuellement l'objet de deux projets de recherche de l'EAWAG. Le présent article fait état des premiers résultats obtenus.

Le marnage a un effet sur le niveau piézométrique

Pour tenter de savoir si un déplacement de la digue pourrait entraîner des modifications du niveau piézométrique, des profils de

niveau et de température sont effectués sur des points de mesure de l'eau souterraine situés de part et d'autre de la digue et comparés entre eux (Fig. 1). Comme le montre la figure 2, l'effet du marnage se reflète nettement sur le niveau d'eau du Rhône. Du lundi au vendredi (zones en gris) le niveau du fleuve présente des fluctuations quotidiennes de l'ordre d'un mètre (courbe bleu foncée). On observe au niveau des points de mesure de part et d'autre de la digue une évolution similaire quoique atténuée et légèrement décalée dans le temps (courbe bleu claire ou noire). Quand l'eau cesse d'être turbinée tard le vendredi soir, les niveaux se normalisent aussi bien dans le fleuve que dans sa nappe alluviale.

Alors que l'on n'observe pas de modifications significatives du profil thermique au point de mesure situé côté fleuve (courbe bleu claire, Fig. 3), l'évolution des températures de l'autre côté de la digue est clairement influencée par le régime du marnage puisqu'elle est exactement l'inverse de celle observée dans le Rhône (courbe noire, Fig. 3). On mesure ainsi côté terres des fluctuations de température de l'ordre de 0,1 à 0,2 °C pendant les périodes du marnage, la température pouvant augmenter de 0,4 °C pendant le week-end. Des mesures

effectuées à plus grande distance de la digue (>100 m) révèlent que l'influence du marnage sur la nappe n'y est plus perceptible. Les variations de niveau observées à proximité de la digue sont donc probablement dues à une transmission dans le domaine souterrain des ondes de compression causées par le marnage. D'autre part, nos résultats suggèrent aussi l'existence d'échanges d'eau. Etant donné que le pied de la digue situé côté fleuve semble être isolé du reste du système sur le plan hydraulique, il est probable qu'un échange d'eau se produit en dessous de la digue.

La chimie des isotopes fournit certains indices

La chimie des isotopes apporte un complément de valeur à l'étude de la dynamique d'infiltration et d'exfiltration des eaux du Rhône. On entend par isotopes les différentes formes d'un même élément qui se distinguent par leur masse atomique. Ainsi, par exemple, l'élément d'oxygène se rencontre dans l'eau sous la forme de l'isotope ^{16}O , de masse 16, et de l'isotope ^{18}O , de masse 18.

Au cours du cycle de l'eau, ces isotopes se retrouvent dans l'atmosphère qui les restitue à travers les précipitations. Des processus de fractionnement qui se produisent dans l'atmosphère sont à l'origine du fait que les eaux de pluie d'altitude sont plus légères, c'est-à-dire moins riches en ^{18}O , que celles de fond de vallée. La part relative de l'isotope ^{18}O est indiquée en ‰ par rapport à une valeur de référence et désignée par le symbole $\delta^{18}\text{O}$. Des cours d'eau situés à des altitudes différentes présentent ainsi des valeurs différentes de $\delta^{18}\text{O}$. Cette «mémoire de l'altitude» peut être mise à profit pour déterminer l'origine d'une eau donnée. La valeur moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 4) de l'eau du Rhône (-13,32), de sa nappe alluviale (-13,17) et d'un affluent du Rhône, la Printse (-13,12) permet ainsi d'estimer si la masse d'eau souterraine est principalement alimentée par les eaux du Rhône ou par des eaux de montagne. Ne disposant pas encore de données suffisantes à leur sujet,

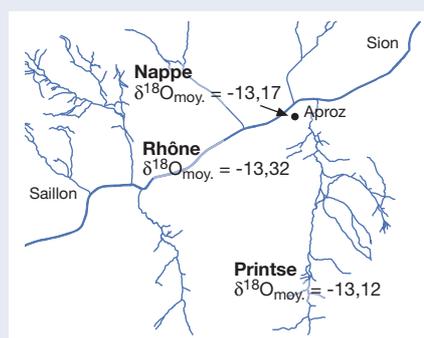


Fig. 4: Données isotopiques dans le domaine d'étude.

Aménagements prévus par la 3^{ème} correction du Rhône [4]

- Actualisation du système de protection contre les crues existant: renforcement et rehaussement des digues en place.
- Extension de l'espace accordé au fleuve et revitalisation des rives.
- Creusement d'un deuxième écoulement parallèle au Rhône pour recueillir les eaux des restitutions hydroélectriques.

nous avons été contraints de négliger l'influence des eaux souterraines d'amont et des précipitations. D'après nos calculs, l'eau de la nappe alluviale provient à parts à peu près égales du Rhône et des zones de montagne.

Une diversité amoindrie sous l'effet du marnage

Un deuxième projet de l'EAWAG est actuellement consacré à l'étude des effets du régime de marnage sur l'équilibre écologique d'un tronçon de cours d'eau revitalisé. Ces recherches sont basées sur une observation sur plusieurs années de la diversité de la faune riveraine invertébrée aquatique et terrestre de divers cours d'eau. Des échantillons sont prélevés de part et d'autre de la ligne de rivage, c'est-à-dire aussi bien dans le domaine immergé que dans le domaine émergé de la rive. Pour l'étude, 12 tronçons différents ont été sélectionnés en fonction de leur état hydrologique et morphologique. Figure 5 représente les résultats de la première campagne de prélèvements. Conformément à notre hypothèse de départ, le régime de marnage s'avère néfaste pour la biodiversité. Ainsi, le nombre de taxons d'invertébrés aquatiques est nettement plus faible dans les cours d'eau soumis au marnage que dans ceux présentant un régime d'écoulement naturel. On observe le même phénomène, quoique moins prononcé, dans le cas des invertébrés terrestres (Fig. 5A). Contrairement à leurs homologues aquatiques, les invertébrés terrestres présentent une biodiversité dépendante des caractéristiques morphologiques du milieu: dans les tronçons rectifiés, le nombre de taxons est près de deux fois plus faible que sur les rives de morphologie naturelle (Fig. 5B). Ces résultats semblent indiquer qu'un élargissement du lit des cours d'eau peut avoir une répercussion tout à fait positive sur la faune riveraine terrestre. D'un autre côté, il semble indispensable de travailler sur le régime de marnage si l'on souhaite donner une réelle chance aux communautés aquatiques.

Retour à la question de départ ...

Une revitalisation du fleuve est-elle oui ou non compatible avec une forte activité de production hydroélectrique? Dans l'état actuel de nos connaissances, nous pouvons répondre à cette question par un «non» prudent pour le Rhône.

Pour la sécurisation du fond de vallée, on ne peut se passer de digues même dans le cadre d'un élargissement du lit. Si l'on remplace les digues vieillissantes par des aménagements modernes, le *statu quo* hydro-



La restitution des eaux turbinées provoque l'effet du marnage.

lique de la nappe alluviale ne devrait pas être compromis de façon inquiétante.

D'un point de vue biologique, il s'avère qu'un régime du marnage s'opposerait au bon développement d'une biocénose naturelle sur les rives des tronçons élargis. Il est donc nécessaire de prendre des mesures atténuant les effets de ce régime d'écoulement comme par exemple, la mise en place de réservoirs ou de canaux latéraux destinés à absorber l'effet du marnage. Si l'on veut donc que la troisième correction du Rhône soit un succès, il faut qu'elle s'appuie sur une combinaison de mesures techniques structurelles «rigides» et de mesures «souples» plus écologiques.

Dans le cas du Rhône, il faut tenir compte de deux faits importants: Ce fleuve présente un cours fortement modifié par des aménagements structurels divers (endiguements, etc.) et il est fortement sollicité par la production d'hydroélectricité. Il est donc utopique d'espérer que les mesures prévues permettront de transformer le cours inférieur du Rhône en une idylle à forte richesse faunistique et floristique. «*Le Rhône (...)* symbole d'une force inflexible, toujours

jeune et triomphante, qui descend vers le soleil, il suscite dans notre esprit des pensées vivantes» [1] – ces aspirations poétiques restent un idéal dont il faut s'efforcer de s'approcher le plus possible.



Markus Fette est ingénieur et prépare une thèse de doctorat à la division «Eaux de surface» de l'EAWAG. Les études présentées s'inscrivent dans le cadre du projet «Rhône» de l'EAWAG et du WSL.

Coauteurs:

Bernhard Wehri, Achim Pätzold, Klement Tockner

Plus d'informations: www.rhone-thur.eawag.ch

- [1] Mariétan I. (1953): Le Rhône, la lutte contre l'eau en Valais. Edition du Griffon, Neuchâtel, 22 p.
- [2] Willi H.-P. (2001): Conjuger protection contre les crues et écologie des cours d'eau. EAWAG news 51f, 26–28.
- [3] Friedrich G. (1986): Was bedeutet Renaturierung von Fließgewässern? – LWA-Materialien Nr. 3/86. Aktuelle Fragen der Unterhaltung von Fließgewässern, S. 23–35.
- [4] Kanton Wallis (2000): Dienststelle für Strassen und Flussbau: Broschüre zur Dritten Rhonekorrektion. Voir aussi: www.vs.ch/rhone.vs

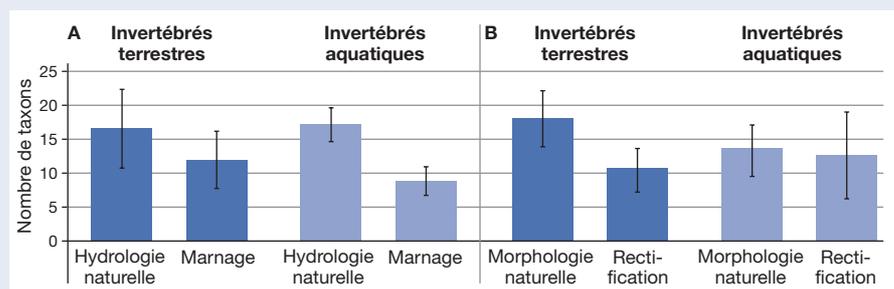


Fig. 5: Diversité de la faune invertébrée aquatique et terrestre des cours d'eau à fortes fluctuations de niveau (régime marnage) ou à régime d'écoulement naturel (A) ainsi que dans des cours d'eau à rives aménagées et à rives naturelles (B).

Effets des changements climatiques sur les hydrosystèmes alpins

Les changements climatiques ont une répercussion directe sur le cycle de l'eau dans les Alpes. Les 10 dernières années ont probablement été les plus chaudes du dernier millénaire. Si ce réchauffement se maintient, les conséquences se feront sentir au niveau du cycle de l'eau en Suisse. Il faudra s'attendre à une diminution de la quantité des précipitations en été et à une augmentation en hiver, de même qu'à une augmentation de la limite des neiges éternelles et à une fonte des glaciers. Mais quelles seront les conséquences sur les eaux alpines?

Les hydrosystèmes alpins – rivières et fleuves, petits et grands lacs, eaux souterraines, occupant pores, fissures et aquifères – font partie du cycle global de l'eau. Par le jeu de l'évaporation et des précipitations, il relie entre eux l'atmosphère, le sol, la végétation et les hydrosystèmes. Le cycle de l'eau est influencé par le climat et les conditions météorologiques et, inversement, ceux-ci sont également sous son influence, il s'agit d'une boucle de régulation très complexe. Pour encore compliquer le tout, l'homme s'immisce dans cette boucle de régulation par les usages qu'il fait de l'eau: rétention dans des lacs et réservoirs, dérivation vers d'autres bassins versants, irrigation à grande échelle de surfaces agricoles, drainage de zones humides, actions modifiant le niveau des nappes phréatiques. Dans nos régions tempérées, les relations entre climat, conditions météorologiques et

cycle de l'eau semblent se maintenir sur de longues périodes, c'est-à-dire sur plusieurs siècles, à condition que le climat global ne se modifie pas. Cette règle vaut également pour le milieu alpin.

Variations au sein du cycle de l'eau dans le passé proche et lointain

Pour évaluer l'évolution future du climat, on ne saurait négliger de considérer le cycle de l'eau et en particulier les précipitations. Dans toutes les régions de Suisse, elles ont présenté d'importantes fluctuations au cours des 100 dernières années (Fig. 1): Dans le bassin versant du Ticino, par exemple, elles ont varié entre 1084 mm en 1949 et 3038 mm en 1977 – ce qui signifie qu'elles varient du simple au triple. Probst et Tardy [1] ont analysé l'écoulement des fleuves et grandes rivières et ont pu montrer

que ces variations étaient applicables dans le monde entier. Elles sont liées à des fluctuations au niveau de la circulation générale de l'atmosphère.

Les débits sont indirectement reliés aux précipitations. Si l'évaporation se maintient à un niveau constant, ils suivent au cours des ans les variations des précipitations. Celles-ci ne s'écoulent cependant pas toujours directement et sont partiellement stockées dans le manteau neigeux et les glaciers, dans le sol, dans les aquifères et dans les lacs naturels et artificiels. La libération d'eau à partir de ces réserves influence les débits pendant une courte période de temps. Suivant la place occupée par les glaces et les neiges dans un bassin versant, on distingue divers types de régimes hydrologiques caractérisés par des évolutions différentes des débits au cours de l'année. La figure 2 présente un certain nombre de régimes saisonniers. Le type «a-glaciaire» présente les fluctuations saisonnières les plus marquées. Il comprend des cours d'eau principalement alimentés par la fonte des neiges et des glaces. Le débit moyen mensuel peut facilement y varier d'un facteur 30 entre l'hiver et l'été. Les fluctuations les plus faibles sont observées dans les cours d'eau de type «pluvial supérieur» principalement alimentés par les pluies.

Si l'on considère les débits extrêmes correspondant aux périodes d'étiages ou de crues, les différences sont encore plus marquées. Dans le Rappengraben, une rivière au bassin versant très restreint, on a mesuré des débits allant de 0,1 l/s à plus de 2300 l/s. Par contre, dans le Rhin au bassin versant très étendu (dont on ne prend en compte que la partie située en amont de Bâle), on observe des extrêmes comprises entre 205 m³/s en 1858 et 5700 m³/s en 1876.

Le problème réside dans le fait que la société et le secteur de l'économie de l'eau adoptent les valeurs extrêmes des 100 dernières années en tant que valeurs empiriques de référence. Si l'on remonte cependant plus loin dans le temps, force est de

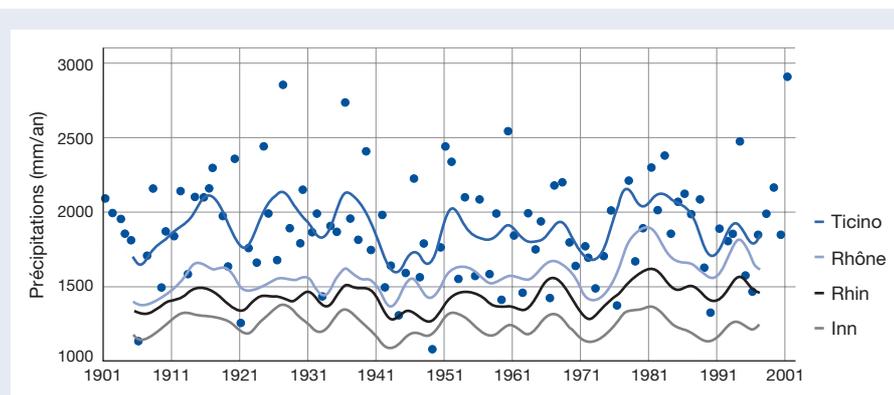


Fig. 1: Séries chronologiques des précipitations annuelles (mm/an) mesurées de 1901 à 2002 dans les bassins versant du Ticino jusqu'à Bellinzona, du Rhône jusqu'au Lac Léman, du Rhin jusqu'à Bâle (Suisse uniquement) et de l'Inn jusqu'à la frontière. Pour le Ticino, chacune des valeurs annuelles est de surcroît indiquée par des points [7].

constater que ces valeurs empiriques ne rendent pas compte de toute l'ampleur des variations possibles. Pfister [2] a étudié les changements climatiques survenus au cours des 500 dernières années et a constaté que le XX^e siècle était un siècle



Une lave torrentielle en action.



Le résultat: Davantage de laves torrentielles suite au réchauffement du climat?

particulièrement clément. Ainsi, pour les gens du XVIII^e siècle, les lacs gelés en hiver étaient chose tout à fait commune et ils étaient habitués à des hivers secs et froids. En même temps, la sécheresse estivale était assez fréquente: avant 1730, les étés secs se produisaient tous les 12 à 15 ans, contre tous les 50 ans plus tard et même une seule fois (en 1947) au XX^e siècle. La période comprise entre 1576 et 1635 est marquée par des mois d'été froids et humides ainsi que par une avancée des glaciers. Depuis ce temps, les étés aussi extrêmes sont devenus rares.

La dynamique des crues s'est, elle aussi, modifiée: Dans les cantons de montagne que sont le Valais, l'Uri, le Tessin et les Grisons, les périodes de 1550 à 1580 et de 1827 à 1875 sont particulièrement touchées par les inondations, ces événements paroxysmiques étant par contre plutôt rares entre 1641 et 1706 ainsi qu'entre 1927 et 1975. Au XX^e siècle, on observe une recrudescence des inondations depuis 1977. Il n'est donc pas étonnant que Schmidli et ses collaborateurs [3] observent une augmentation des précipitations hivernales et que Frei et Schär [4] fassent état d'une fréquence accrue des périodes de fortes précipitations depuis cette date.

Le cycle de l'eau dans le futur proche et lointain

Les années 1990 ont probablement été la décennie la plus chaude du dernier millénaire. Le troisième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais IPCC) l'a bien montré [5]. Ce rapport insiste d'autre part sur le fait que la plus grande part du réchauffement survenu au cours des 50 dernières années est attribuable aux activités anthropiques. L'Organisme consultatif sur les Changements Climatiques (Occc) [6] a établi à partir du rapport du GIEC une liste

des principaux effets concernant la Suisse. Suite au réchauffement probablement persistant de l'atmosphère, il faut s'attendre à des conséquences significatives sur le cycle de l'eau en Suisse:

- diminution des précipitations en été et augmentation en hiver; variations plus importantes de la quantité annuelle de précipitations;
- augmentation de la fréquence des fortes précipitations en hiver (cf. Fig. 3);
- réduction de la part de la neige dans les précipitations;
- montée de la limite des neiges de 200 m;
- fonte d'une grande partie des glaciers;
- augmentation de 10% du volume écoulé au nord des Alpes, diminution de ce volume de 10% au sud des Alpes;
- décalage d'un degré des types de régimes hydrologiques (cf. Fig. 2);
- augmentation de la fréquence et de l'ampleur des crues surtout hivernales dans les régions de moyenne et de faible altitude;
- accentuation de la sécheresse en été, surtout dans les cours inférieurs;
- fluctuations plus importantes au niveau de la dynamique fluviale;
- augmentation de la fréquence des laves torrentielles dans les zones très pentues occupées par des éboulis; ces zones apparaissent à la surface suite à la fonte du permafrost et des glaciers.

Soulignons toutefois que les changements annoncés dans notre région restent incertains. Les modèles climatiques globaux livrent en effet des scénarios assez incertains à l'échelle régionale.

Conséquences pour l'économie de l'eau

Les changements climatiques en progression peuvent avoir pour conséquence que les éléments du cycle de l'eau prennent des valeurs qui dépassent les valeurs empiriques communément admises actuelle-

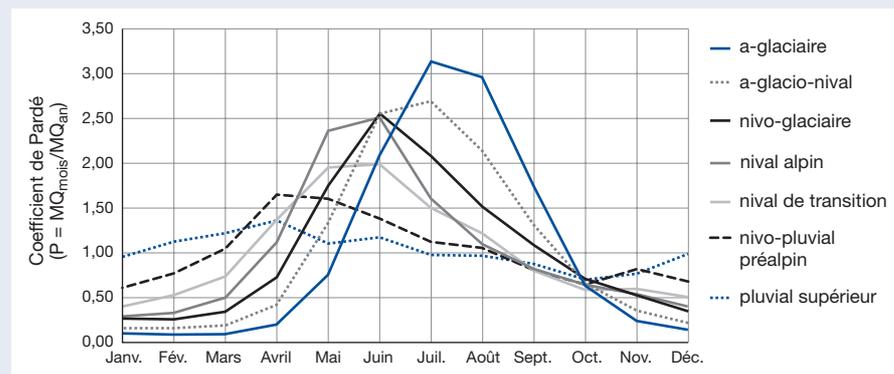


Fig. 2: Régimes d'écoulement moyens de bassins versants suisses situés à différentes altitudes, allant par étapes de 300 m d'altitude du régime pluvial supérieur (800 m d'altitude moyenne) au régime a-glaciaire (2700 m d'altitude) [d'après 8]. MQ = débit moyen.

ment. Il faut donc s'attendre à en observer les conséquences à divers niveaux du secteur économique de l'eau:

- Suite à une baisse des précipitations estivales, les lacs et cours d'eau contiendraient et transporteraient moins d'eau. De plus, les surfaces agricoles nécessiteraient une irrigation artificielle supplémentaire, ce qui aggraverait la pénurie. Cette pénurie en eau aurait en plus des conséquences fâcheuses sur la qualité des eaux. D'un côté, les polluants déversés dans les milieux aquatiques ne seraient plus assez dilués. D'un autre côté, on assisterait à un réchauffement des eaux. Normalement, la température de l'eau et celle de l'air ont une évolution parallèle (Fig. 4). Si les débits diminuent, il faut s'attendre à un réchauffement plus important que la normale, et ce, plus particulièrement dans les cours d'eau de petite taille.

- Il n'est pas exclu que des conséquences se fassent sentir au niveau des aquifères situés à proximité des rivières, étant donné qu'une réduction de l'infiltration d'eau de pluie et d'eau fluviale se produirait en même temps qu'une augmentation de l'évaporation.

- La gestion des grands lacs suisses (exception faite du Lac de Constance et du Walensee) s'appuie sur l'expérience acquise au cours du XX^e siècle ainsi que sur un équilibre entre les intérêts des divers usagers de ces lacs. Une augmentation des précipitations hivernales pourrait accroître l'importance des impératifs sécuritaires contre les crues, ce qui nécessiterait l'établissement de nouveaux règlements ou peut-être même la construction de nouveaux aménagements hydrauliques. Étant donné que de telles adaptations demandent une longue période de planification et de mise en œuvre, il est besoin au plus vite de scénarios prévisionnels concernant ce problème.

- La distribution dans le temps de l'alimentation des lacs de rétention par leurs affluents sera probablement modifiée de même que celle de la demande en électricité. Il se peut d'autre part que les gestionnaires des lacs soient confrontés au besoin venant de l'aval de volumes de rétention supplémentaires pour les crues devenues plus importantes et plus fréquentes. Un important travail de préparation doit donc être fourni au niveau politique, juridique et technique pour adapter les lacs de rétention à ces nouvelles fonctions.

- S'il s'avère que les crues hivernales ont une influence accrue sur celles qui se produisent dans les pays situés en aval, il faut s'attendre à ce que ceux-ci demandent à la Suisse d'adopter des mesures visant à assurer une certaine rétention au niveau des lacs et réservoirs. Les deux points précédemment cités prennent alors une dimension politique particulière.

- Enfin, la navigation fluviale pourrait être également touchée: Dans le Rhin, il faut s'attendre en particulier en été et en automne à des niveaux d'eau très faibles jusqu'aux Pays-Bas, et en hiver au passage de crues.

En conséquence de cela, les bateaux ne pourraient plus atteindre la Suisse à moins de n'être que partiellement chargés, ce qui induirait une augmentation du prix des marchandises en vrac (comme le pétrole).

Le secteur de l'économie de l'eau s'adapte depuis toujours aux situations extrêmes en réagissant et en adoptant des mesures flexibles. Les changements climatiques dont font état les prévisions correspondent cependant à une situation particulièrement délicate à laquelle il est possible de réagir dès à présent en adoptant des mesures calquées sur le principe du «sans regret». Il s'agit d'une part de mesures visant à minimiser les effets des changements climatiques et d'autre part de démarches souhaitables à d'autres points de vue, comme par exemple une adaptation de la politique d'aménagement du territoire ou une gestion plus flexible des grands lacs.



Bruno Schädler est docteur en physique de l'atmosphère et en hydrologie. Il dirige la division «Economie des eaux» de l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, à Berne-Ittingen, et exerce les fonctions d'expert des eaux et du climat au sein de l'Organe consultatif sur les Changements Climatiques (OcCC).

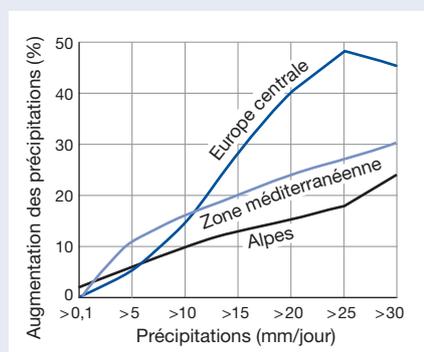


Fig. 3: Augmentation des précipitations hivernales dans trois régions d'Europe calculée pour une augmentation de 2 °C de la température et de 15% de l'humidité de l'atmosphère par rapport aux conditions actuelles [d'après 9].

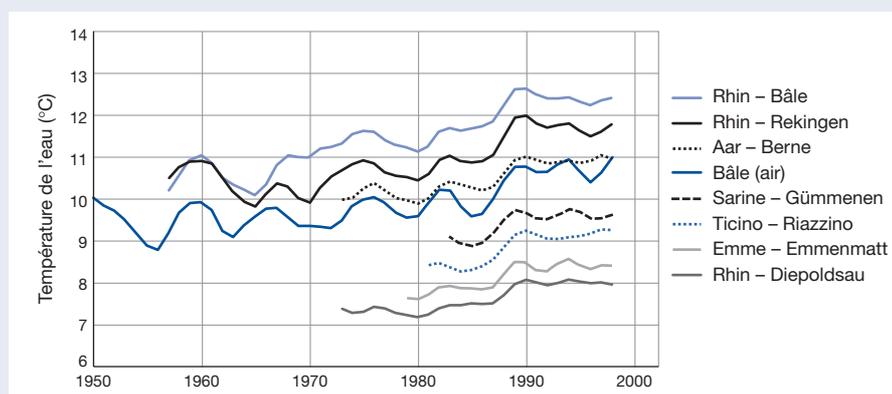


Fig. 4: Température moyenne annuelle de l'eau observée de 1954 à 2001 dans divers fleuves et rivières suisses comparée à la température de l'air à Bâle. Les séries chronologiques des moyennes annuelles ont été lissées avec un filtre passe-bas gaussien appliqué sur 7 ans [d'après 10].

- [1] Probst J.L., Tardy Y. (1987): Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *Journal of Hydrology* 94, 289–311.
- [2] Pfister C. (1999): *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*. Verlag Haupt, Bern, 304 S.
- [3] Schmidli J., Schmutz C., Frei C., Wanner H., Schär C. (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *International Journal of Climatology* 22, 1049–1074.
- [4] Frei C., Schär C. (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate* 14, 1564–1584.
- [5] IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 944 p.
- [6] OcCC (2002): *Le climat change, en Suisse aussi – Les points principaux du troisième rapport du GIEC sur l'état des connaissances, du point de vue de la Suisse*. Berne, 48 p.
- [7] Schädler B. (1985): *Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilungen der Landeshydrologie Nr. 6*, Bern, 84 S.
- [8] Weingartner R., Aschwanden H. (1992): Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. *Atlas hydrologique de la Suisse*, planche 5.2, Berne.
- [9] Frei C., Schär C., Lüthi D., Davies H. C. (1998): Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophysical Research Letters* 25, 1431–1434.
- [10] Jakob A., Liechti P., Schädler B. (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis?. *Gas-Wasser-Abwasser* 76, 288–294.

Publications

Pour vos commandes, veuillez utiliser le bulletin encarté au milieu du présent numéro.

- [3158] **Siegrist H., Vogt D., Garcia-Heras J.L., Gujer W.** (2002): Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. *Environ. Sci. Technol.* 36 (5), 1113–1123.
- [3159] **Larsen T.A., Rauch W., Gujer W.** (2001): Waste Design Paves the Way for Sustainable Urban Wastewater Management. *Proc. Internat. UNESCO Sympos. «Frontiers in Urban Water Management – Deadlock or Hope?»*, UNESCO, Paris, pp. 219–229.
- [3160] **Arscott D.B.** (2002): Habitat Heterogeneity and Aquatic Invertebrates Along an Alpine Floodplain River. *Diss. ETHZ No. 14 443*, Zurich.
- [3161] **Winder M.** (2002): Zooplankton Ecology in High-mountain Lakes. *Diss. ETHZ No. 14 519*, Zurich.
- [3162] **Holocher J.** (2002): Investigations of Gas Exchange in Quasi-saturated Porous Media Using Noble Gases as Conservative Tracers. *Diss. ETHZ No. 14 588*, Zurich.
- [3163] **Gujer W.** (2002): Microscopic Versus Macroscopic Biomass Models in Activated Sludge Systems. *Water Sci. Technol.* 45 (6), 1–11.
- [3164] **Siegrist H., Rieger L., Koch G., Kühni M., Gujer W.** (2002): The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. *Water Sci. Technol.* 45 (6), 61–76.
- [3165] **Zehnder A.J.B.** (2002): Wasserressourcen und Bevölkerungsentwicklung. *Nova Acta Leopoldina NF 85* (323), 399–418.
- [3166] **Haller M.Y., Müller S.R., McArdell C.S., Alder A.C., Suter M.J.-F.** (2002): Quantification of Veterinary Antibiotics (Sulfonamides and Trimethoprim) in Animal Manure by Liquid Chromatography-Mass Spectroscopy. *J. Chromatogr. A* 952, 111–120.
- [3167] **Clarke T.E., Rohrbach M.R., Tari L.W., Vogel H.J., Köster W.** (2002): Ferric Hydroxamate Binding Protein FhuD from *Escherichia coli*: Mutants in Conserved and Non-conserved Regions. *BioMetals* 15, 121–131.
- [3168] **Ward J.V., Malard F., Tockner K.** (2002): Landscape Ecology: a Framework for Integrating Pattern and Process in River Corridors. *Landscape Ecol.* 17 (Suppl. 1), 35–45.
- [3169] **Hunziker R.W., Escher B.I., Schwarzenbach R.P.** (2002): Acute Toxicity of Triorganotin Compounds: Different Specific Effects on the Energy Metabolism and Role of pH. *Environ. Toxicol. Chem.* 21 (6), 1191–1197.
- [3170] **Robinson C.T., Tockner K., Burgherr P.** (2002): Seasonal Patterns in Macroinvertebrate Drift and Seston Transport in Streams of an Alpine Glacial Flood Plain. *Freshwater Biol.* 47, 985–993.
- [3171] **Lacour S., Kolb A., Zehnder A.J.B., Landini P.** (2002): Mechanism of Specific Recognition of the *aidB* Promoter by σ^S -RNA Polymerase. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 292, 922–930.
- [3172] **Robinson C.T., Tockner K., Ward J.V.** (2002): The Fauna of Dynamic Riverine Landscapes. *Freshwater Biol.* 47, 661–677.
- [3173] **Egli T.** (2002): Metabolism of Mixtures of Organic Pollutants. In: «Encyclopedia of Environmental Microbiology», G. Bitton (Ed.). John Wiley, New York, pp. 1869–1877.
- [3174] **Wanner O.** (2002): Modeling of Biofilms. In: «Encyclopedia of Environmental Microbiology», G. Bitton (Ed.). John Wiley, New York, pp. 2083–2094.
- [3175] **Lienert J., Diemer M., Schmid B.** (2002): Effects of Habitat Fragmentation on Population Structure and Fitness Components of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae). *Basic Appl. Ecol.* 3, 101–114.
- [3176] **Lienert J., Fischer M., Schneller J., Diemer M.** (2002): Isozyme Variability of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae) in Relation to Habitat Size, Isolation, and Plant Fitness. *Amer. J. Botany* 89 (5), 801–811.
- [3177] **Lienert J., Fischer M., Diemer M.** (2002): Local Extinctions of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae) in Switzerland: a Revisitation Study Based on Herbarium Records. *Biol. Conservation* 103, 65–76.
- [3178] **Schreiber J.V., Frackenhohl J., Moser F., Fleischmann T., Kohler H.-P.E., Seebach D.** (2002): On the Biodegradation of β -Peptides. *ChemBioChem* 3, 424–432.
- [3179] **Holocher J., Matt V., Aeschbach-Hertig A., Beyerle U., Hofer M., Peeters F., Kipfer R.** (2001): Noble Gas and Major Element Constraints on the Water Dynamics in an Alpine Floodplain. *Ground Water* 39 (6), 841–852.
- [3180] **Cadieux N., Bradbeer C., Reeger-Schneider E., Köster W., Mohanty A.K., Wiener M.C., Kadner R.J.** (2002): Identification of the Periplasmic Cobalamin-binding Protein BtuF of *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 184 (3), 706–717.
- [3181] **Greber E., Baumann A., Cornaz S., Herold T., Kožel R., Muralt R., Zobrist J.** (2002): Grundwasserqualität in der Schweiz. *Gas, Wasser, Abwasser* 82 (3), 191–201.
- [3182] **Frutiger A., Müller R.** (2002): Der Rote Sumpfkrebs im Schübelweiher (Gemeinde Küssnacht ZH) – Auswertung der Massnahmen 1998–2001 und Erkenntnisse. *EAWAG, Dübendorf*, 26 S.
- [3183] **Laemmlli C.M., Schönenberger R., Suter M., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2002): Tfd_{II}, One of the Two Chloromuconate Cycloisomerases of *Ralstonia eutropha* JMP134 (pJP4), Cannot Efficiently Convert 2-chloro-*cis,cis*-muconate to *trans*-dienelactone to Allow Growth on 3-chlorobenzoate. *Arch. Microbiol.* 178 (1), 13–25.
- [3184] **Lichtensteiger T.** (2002): Auf dem Weg zum Endlager: Auswirkung thermischer Behandlungen auf den Stoffhaushalt von Deponien. *Österr. Wasser- & Abfallwirtschaft* 54 (3/4), 29–36.
- [3185] **Xue H.B., Sigg L.** (2002): A Review of Competitive Ligand-exchange-voltammetric Methods for Speciation of Trace Metals in Freshwater. In: «Environmental Electrochemistry: Analyses of Trace Element Biogeochemistry.» T.F. Rozan, M. Tallefert (Eds.). ACS Symposium Series 811, Amer. Chem. Soc., Washington D.C., 336–370.
- [3186] **Zwank L., Schmidt T.C., Haderlein S.B., Berg M.** (2002): Simultaneous Determination of Fuel Oxygenates and BTEX Using Direct Aqueous Injection Gas Chromatography Mass Spectrometry (DAI-GC/MS). *Environ. Sci. Technol.* 36 (9), 2054–2059.
- [3187] **Bürgi H., Stadelmann P.** (2002): Change of Phytoplankton Composition and Biodiversity in Lake Sempach Before and During Restoration. *Hydrobiologia* 469, 33–48.
- [3188] **Burkhardt-Holm P., Peter A., Segner H.** (2002): Decline of Fish Catch in Switzerland – Project Fishnet: A Balance Between Analysis and Synthesis. *Aquatic Sci.* 64, 36–54.
- [3189] **Tropel D., van der Meer J.R.** (2002): Identification and Physical Characterization of the HbpR Binding Sites of the *hbpC* and *hbpD* Promoters. *J. Bacteriol.* 184 (11), 2914–2924.
- [3190] **Dähn R.** (2001): Determination of Ni(II) and Th(IV) Sorption Mechanisms on Clay Mineral Surfaces: A Combined Macroscopic, Spectroscopic, and Microscopic Approach. *Diss. ETHZ No. 14 390*, Zurich.
- [3191] **Malard F., Tockner K., Dole-Olivier M.-J., Ward J.V.** (2002): A Landscape Perspective of Surface-Subsurface Hydrological Exchanges in River Corridors. *Freshwater Biol.* 47, 621–640.
- [3192] **Egli T., Köster W., Meile L.** (2002): Pathogenic Microbes in Water and Food: Changes and Challenges. *FEMS Microbiol. Rev.* 26, 111–112.

International Water Management Course (IWMC)

Les ressources en eau du monde sont soumises à une pression croissante du fait de l'accroissement des populations humaines



et de l'augmentation de la demande en nourriture et en biens matériels qui en découle. Alors que les régions arides des pays en voie de développement auront logiquement à faire face à une multitude de graves problèmes d'approvisionnement, les pays industrialisés génèrent leur propre crise en puisant trop fortement dans leurs ressources en eau qui en viennent elles aussi à s'amenuiser. Ces pays ont un rôle important à jouer dans le développement de stratégies de gestion assurant pour les générations futures le maintien de la qualité et de la disponibilité de cette précieuse ressource. C'est pour répondre à ces préoccupations que l'EAWAG et la Swiss Re proposent conjointement un cours intitulé «International Water Management Course» et visant à fournir des connaissances approfondies sur la situation globale et régio-

nale dans le domaine de l'eau tout en mettant l'accent sur les pays industrialisés.

Ce cours aura lieu du 5 au 10 juillet 2003 et s'adresse aux décideurs et professionnels des secteurs de la gestion des eaux et des réseaux et équipements urbains (cadres de sociétés d'approvisionnement et d'assainissement, industrie, agences gouvernementales, ONG et consultants).

Le cours est divisé en différents modules thématiques et propose

- une description du contexte scientifique, technique, socio-économique et politique,
- des études de cas de gestion des eaux visant à améliorer la capacité à résoudre les problèmes de manière interdisciplinaire,
- en soirée, des cours sur des questions d'actualité choisies sur le thème de l'eau.

Pour plus d'informations:

www.iwmc.eawag.ch

Bilan de la dernière Table ronde

«Rien ne sera plus jamais comme avant. Je suis définitivement consciente de la nécessité de respecter l'eau en tant que ressource naturelle», explique une participante suite à la dernière Table ronde de Science et Cité. «Je pensais que ce serait plus simple, mais nous sommes tout de même parvenus à nous comprendre et à nous enrichir mutuellement», commente de son côté un chercheur de l'EAWAG. Le dialogue entre profanes et chercheurs a progressé. C'est la conclusion tirée par les participants au projet pilote «Table ronde – Science et Cité» suite à leur dernière rencontre des 4 et 5 octobre 2002. Cette expérience aura duré 3 ans. Citoyens et chercheurs de l'EAWAG se sont rencontrés à l'occasion de 12 journées pour discuter de projets de recherches et de questions spécifiques touchant au thème de l'eau. Les enseignements tirés de ces rencontres ainsi que les réflexions utiles aux projets de dialogues à venir sont présentés dans un rapport final paru en début 2003. Pour plus d'informations:

www.eawag.ch/news/science_et_cite

T. Kawara, Zürich



Un nouveau biosenseur pour le dosage de l'arsenic dans l'eau

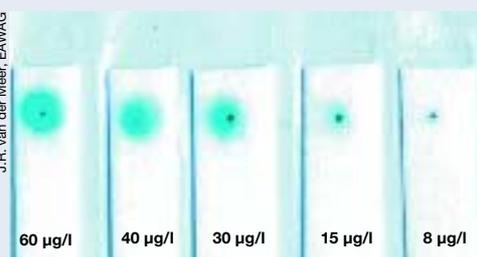
L'arsenic est un important polluant inorganique de l'eau potable dans de nombreuses parties du monde. La situation est particulièrement préoccupante au Bangladesh: l'eau de consommation peut y contenir jusqu'à 1000 µg d'arsenic par litre alors que le seuil préconisé par l'OMS est de 10 µg/l. Plus d'un million de personnes présentent déjà un empoisonnement par ce métal lourd (voir EAWAG news 53). Pour pouvoir analyser les eaux de chacun des quelque 9 millions de

puits privés du pays, il faut disposer d'une méthode de détection à la fois peu onéreuse, fiable,

sensible et adaptée à l'usage sur le terrain. Pour répondre à ce besoin, une équipe de chercheurs de l'EAWAG a mis au point un nouveau biosenseur permettant de détecter l'arsenic. Ce test fait appel à des bactéries génétiquement modifiées qui se colorent en bleu en présence d'arsenic, même à des concentrations très faibles. L'EAWAG a déposé une demande de brevet pour cette innovation. Pour plus d'informations:

www.eawag.ch/news/arsenbiosensor

J.R. van der Meer, EAWAG



Bandelettes de papier indicateur colorées par l'arsenic.