

news



Dossier:
**Le biotope aquatique –
services rendus et besoins**



Janet Hering est directrice de l'Eawag et enseigne aux EPF de Lausanne et de Zurich.

La viabilité des écosystèmes aquatiques

Nous constatons tous au quotidien que l'eau est indispensable à notre vie. Que ce soit pour l'eau potable, la toilette et le ménage ou pour les activités de loisir et les transports, nous sommes totalement dépendants de cette ressource naturelle. Et c'est encore elle qui fournit une grande partie de l'électricité que nous consommons puisque le secteur hydraulique livre près de 20 pour cent de l'énergie électrique produite dans le monde et presque 60 de celle produite en Suisse. En revanche, nous avons généralement une conscience beaucoup moins aiguë des bénéfices indirects que nous tirons des écosystèmes aquatiques. Ainsi, les précipitations assurent près de 80 pour cent de l'irrigation des terres agricoles à l'échelle de la planète et presque la totalité en Suisse. Et si elle a des répercussions évidentes sur la pêche, la productivité des milieux aquatiques est tout aussi indispensable à la vie des oiseaux d'eau et au développement de nombreux animaux terrestres. Toutefois, l'environnement aquatique ne peut rendre tous ces services que s'il est préservé et c'est généralement dans leur état le plus naturel que les écosystèmes sont les plus productifs.

Mais à travers ses activités, l'homme impose de lourdes contraintes aux milieux aquatiques. Ses barrages, endiguements et drainages en transforment la morphologie tandis que les rejets agricoles, industriels ou domestiques de matières nutritives, pathogènes et polluants viennent en perturber l'équilibre biologique et physico-chimique. A cela viennent s'ajouter les espèces invasives, souvent introduites par inadvertance, ou les repeuplements en poissons d'élevage qui en menacent l'intégrité écologique. Pour pouvoir gérer les ressources de manière intelligente et ciblée et protéger les milieux naturels, il faut avant tout comprendre comment les écosystèmes aquatiques réagissent à ces perturbations ou, en d'autres termes, identifier les facteurs qui leur permettent de conserver leur résilience et leurs capacités d'adaptation.

C'est pourquoi l'un des trois axes de recherche définis par l'Eawag dans son plan stratégique 2012–2016 concerne la viabilité des écosystèmes aquatiques. L'influence des modifications environnementales d'origine anthropique sur les populations et

milieux aquatiques, l'importance de la biodiversité pour le bon fonctionnement des écosystèmes et les possibilités de restauration et de revitalisation des cours d'eau dégradés et endigués seront au cœur des préoccupations des chercheurs. Pour traiter ces questions, deux projets d'envergure voient actuellement le jour: le programme « Cours d'eau suisses » destiné à l'accompagnement scientifique de l'application de la loi révisée sur la protection des eaux entrée en vigueur en 2011 et le projet « Eco Impact » dédié à l'étude des effets d'une élimination des micropolluants dans les stations d'épuration sur les fonctions des écosystèmes aquatiques.

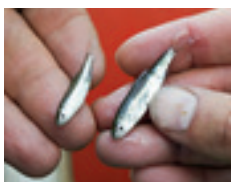
Ces nouvelles activités vont démarrer sur une base solide grâce aux travaux déjà réalisés dans différents domaines et que ce numéro d'Eawag News vous présente: élaboration de méthodes d'évaluation en écotoxicologie, études de terrain sur l'impact des rejets de matières nutritives dans les lacs, élaboration de stratégies de gestion durable dans un contexte de changements climatiques et de conflits d'intérêts, élaboration de modèles prédictifs de l'incidence des options de gestion, analyse du rôle de l'hydraulique dans la nouvelle politique énergétique de la Suisse. Une grande partie de ces recherches s'appuient sur les données livrées par les programmes de surveillance environnementale, ce qui souligne bien toute l'importance de ces dispositifs.

Par son engagement dans la recherche fondamentale et appliquée, l'Eawag souhaite livrer des connaissances utiles à l'adoption de comportements respectueux des ressources aquatiques et à la mise en place d'une gestion durable des eaux qui satisfasse aux besoins des populations humaines tout en permettant aux écosystèmes de remplir leurs fonctions essentielles.

Sommaire

Dossier : Le biotope aquatique – services rendus et besoins

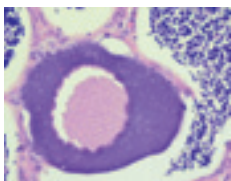
4 Les séquelles de l'eutrophisation



La réduction des rejets de phosphates dans le milieu aquatique est une grande victoire écologique. Pour d'accroître leurs rendements, les pêcheurs demandent de limiter la déphosphatation dans certains

lacs. Mais la fertilisation des milieux naturellement pauvres peut causer la disparition et l'hybridation des espèces.

8 Perturbateurs endocriniens : détecter, évaluer, éliminer



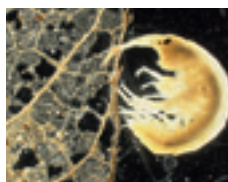
Les perturbateurs endocriniens rejetés dans le milieu aquatique peuvent en affecter la faune. L'éco-toxicologie dispose de tests qui facilitent la détection et l'évaluation de ces micropolluants et aident à

décider des stratégies de dépollution à mettre en œuvre.

12 Pas de diagnostic sans état de référence

Pascal Vonlanthen et Florian Altermatt de l'Eawag sont persuadés de l'importance vitale des programmes de monitoring pour la préservation de la biodiversité et de ses services écosystémiques.

14 Prévoir la présence des organismes dans les rivières



Les différentes espèces de macro-invertébrés occupent une grande diversité d'habitats. Un modèle élaboré par l'Eawag permet de prédire la composition des assemblages

du fond des cours d'eau en fonction de l'évolution du milieu et devrait faciliter les politiques de gestion intégrée en prévoyant les effets des interventions.

18 Gestion des eaux – l'art du compromis

Les écosystèmes aquatiques nous rendent un grand nombre de services, notamment économiques, mais ne peuvent remplir leurs fonctions essentielles que si leurs exigences écologiques sont respectées. Nous devons donc mettre en place des stratégies durables de gestion des ressources. Deux projets réalisés sur le Spöl et dans la zone alluviale de Sandey montrent comment nous pourrions y parvenir.

22 Potentialités et limites de l'hydraulique

La Suisse va bientôt devoir investir des sommes colossales dans l'hydraulique. Pour que ces moyens soient bien employés, il faut trouver des solutions à la fois rentables et écologiquement acceptables pour la production de pointe et le stockage des suppléments produits par les nouvelles énergies renouvelables. Dans l'idéal, aussi bien les rivières que les électriciens pourraient en sortir gagnants.

26 Chercheurs et professionnels doivent travailler la main dans la main



En Suisse, chercheurs et professionnels ont des défis importants à relever dans le domaine des eaux et des milieux aquatiques. Le programme de recherche « Cours d'eau suisses » qui verra le jour cette

année doit fédérer les énergies et tenter de résoudre les problèmes actuels dans le consensus.

Notes

- 28 Récompense pour la Fundación Sodis
- 28 Micropolluants issus de l'assainissement urbain
- 28 Partenariat suisse pour l'eau

eawag
aquatic research

Editeur, Distribution : Eawag, Case postale 611, 8600 Dübendorf, Suisse,
Tél. +41 (0)58 765 55 11, Fax +41 (0)58 765 50 28, www.eawag.ch

Rédaction : Andres Jordi

Collaboration : Andri Bryner, Anke Poiger

Traductions : Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

Copyright : Reproduction possible après accord avec la rédaction.

Parution : 2 fois par ans en français, allemand et anglais. Production chinoise
en coopération avec INFOTERRA China National Focal Point.

Maquette : TBS Identity, Zurich

Mise en page, graphisme et iconographie : Peter Nadler, Fällanden

Impression : Sur papier recyclé

Abonnements et changement d'adresse : Les nouveaux abonné(e)s sont les
bienvenu(e)s ! eawag.news@eawag.ch

ISSN 1420-3928

Les séquelles de l'eutrophisation



Piet Spaak, biologiste, dirige le département d'Ecologie aquatique de l'Eawag.
Coauteur : Pascal Vonlanthen

La réduction des teneurs en phosphates dans les lacs est l'un des plus grands succès de l'histoire de la protection des eaux. Mais, mécontents de la baisse de leurs rendements, les pêcheurs réclament aujourd'hui une atténuation de l'élimination des phosphates dans les stations d'épuration en périphérie du lac de Brienz et d'autres lacs similaires. L'apport de phosphore dans des lacs naturellement pauvres peut cependant provoquer l'extinction ou l'hybridation de certaines espèces.

Grâce à l'interdiction des phosphates dans les lessives intervenue en 1985 et à la construction de stations d'épuration peu à peu équipées de systèmes de déphosphatation, la Suisse a pu, en quelques décennies, résoudre le problème d'eutrophisation que connaissaient ses lacs. La qualité des eaux s'est fortement améliorée et les milieux et populations ont retrouvé un caractère plus naturel. En raison, notamment, du rapport que voient les pêcheurs entre la réduction des apports de nutriments et la baisse du rendement de la pêche dans certains lacs, la question des phosphates a récemment refait son apparition dans le débat public.

La diversité spécifique du lac de Brienz a été étudiée dans le cadre du projet Lac. L'inventaire des espèces de poissons a notamment révélé que ses couches profondes abritaient des corégones de petite taille parfaitement adaptés aux conditions de faible abondance nutritive du milieu.



Stefan Kubi

Ainsi, deux motions déposées auprès du Conseil national et du Conseil des Etats demandent la réalisation de projets pilotes dans lesquels les rejets de phosphore dans le lac de Brienz seraient augmentés de manière contrôlée. Les initiateurs espèrent ainsi stimuler la production primaire (croissance algale) et par voie de conséquence le développement des populations de poissons [1]. Des initiatives similaires sont déjà envisagées pour le lac des Quatre-Cantons et quelques autres lacs.

Disparition d'espèces par éviction ou hybridation. Sans matières nutritives, les milieux aquatiques seraient morts car hostiles à toute forme de vie. Les organismes aquatiques ont en effet besoin d'un minimum de nutriments pour subsister. Les lacs sont naturellement alimentés en matières nutritives grâce aux phénomènes d'érosion et de dégradation qui se déroulent dans leur bassin versant et sont plus ou moins riches selon l'intensité de ces processus. Jusqu'à une certaine limite, un lac est d'autant plus productif qu'il contient de nutriments, la croissance des organismes étant limitée par l'abondance de l'élément nutritif le moins disponible. Pour les algues et sous nos latitudes, ce facteur limitant est le phosphore. Les algues sont les principaux producteurs primaires de nos lacs dont ils constituent la base de la chaîne alimentaire. Pour pouvoir fonctionner, nos écosystèmes lacustres ont donc besoin d'un minimum de phosphore et d'autres nutriments. Ce minimum vital varie d'un lac à l'autre en fonction, notamment, des caractéristiques du bassin versant. Mais au-delà de ces aspects quantitatifs, la richesse nutritive du milieu intervient de façon qualitative dans la vie aquatique en influant sur la composition des communautés biotiques.

L'usage massif et généralisé des lessives et engrais aux phosphates après la Seconde Guerre mondiale a cependant provoqué des apports anormaux de phosphore en provenance des ménages et de l'agriculture dans de nombreux milieux aquatiques suisses. Cet enrichissement a entraîné un développement excessif des algues qui, en consommant l'oxygène disponible dans le milieu, a à son tour provoqué une mortalité massive des poissons. Grâce à une lutte efficace contre ce phénomène dit d'eutrophisation, certains lacs ont aujourd'hui retrouvé leur qualité d'antan (Fig. 1).

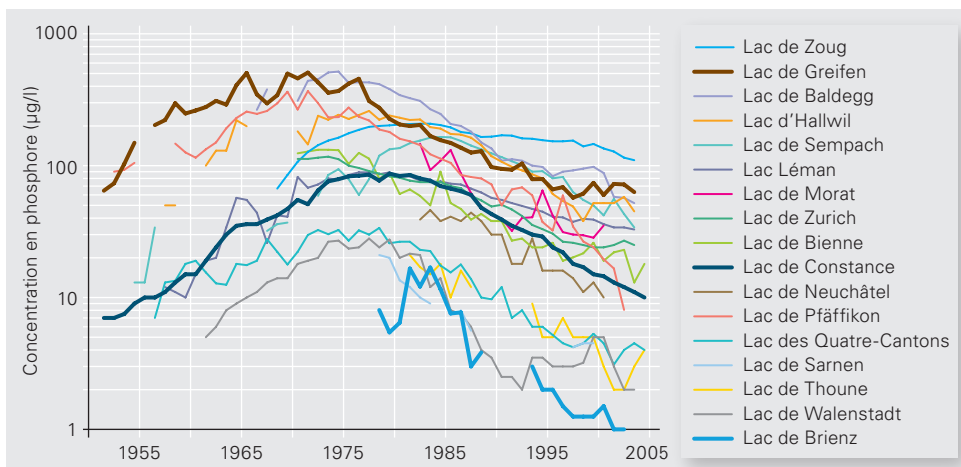


Fig.1 : Grâce à la mise en place d'une stratégie de lutte efficace, les teneurs en phosphore des lacs suisses ont retrouvé des niveaux normaux.

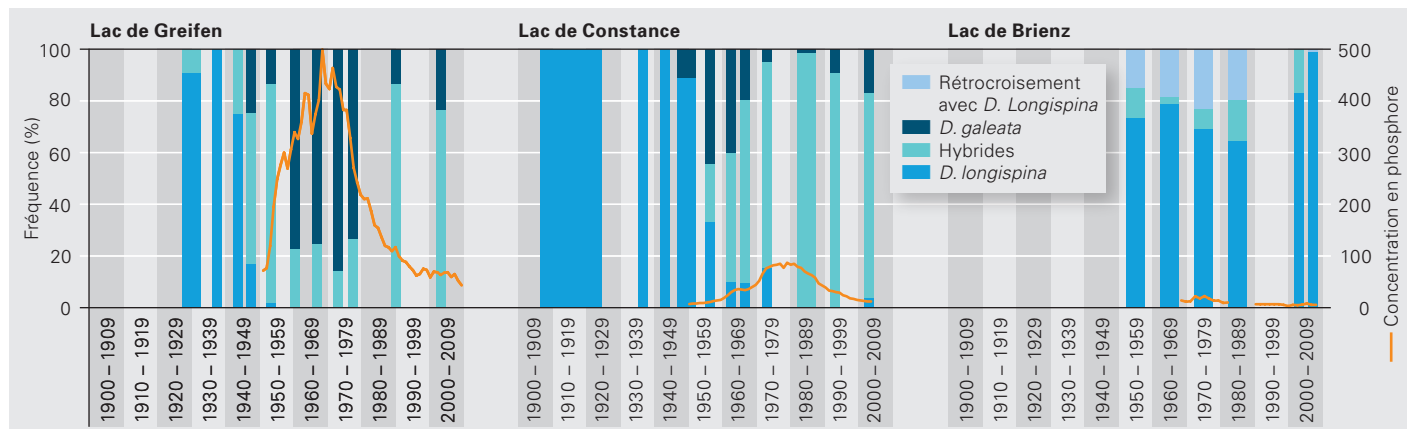
L'eutrophisation des lacs a non seulement altéré la qualité physico-chimique de l'eau mais a également perturbé les écosystèmes lacustres de manière si profonde que certaines modifications sont encore visibles aujourd'hui. Plusieurs études de l'Eawag ont ainsi retracé l'évolution de la composition spécifique des communautés de daphnies depuis les débuts de l'eutrophisation. Ces microcrustacés zooplanctoniques jouent un rôle primordial dans les écosystèmes lacustres en servant de nourriture aux poissons et en particulier aux corégones.

En procédant à l'analyse génétique d'œufs de résistance ou éphippies conservés dans les différentes couches sédimentaires de lacs plus ou moins pollués, nous avons constaté qu'avant l'eutrophisation, l'espèce dominante dans tous les lacs suisses était *Daphnia longispina* [2, 3]. Pendant la phase d'eutrophisation, l'espèce invasive *Daphnia galeata* a réussi à s'imposer et à évincer *Daphnia longispina* dans de nombreux lacs comme le lac de Constance ou le Lac de Greifen. Dans certaines situations, les deux espèces se sont croisées et ont donné naissance à des hybrides fertiles (Fig. 2). De nombreux lacs ne sont ainsi plus peuplés que de *Daphnia galeata* et d'hybrides alors que leurs teneurs en nutriments sont revenues à la normale. Dans les lacs comme le

lac de Brienz qui sont naturellement très pauvres en phosphore et qui ont été moins affectés que d'autres par l'eutrophisation, *Daphnia longispina* a pu se maintenir. Nous avons cependant constaté que des croisements s'étaient opérés entre cette espèce et les hybrides et que bien souvent, les individus actuels de l'espèce *Daphnia longispina* possédaient également du matériel génétique de *Daphnia galeata*; dans de nombreux lacs, l'espèce *Daphnia longispina* n'existe plus sous sa forme génétique d'origine. Certaines modifications s'avèrent donc permanentes et irréversibles.

Perte de niches écologiques. Par une série d'expériences, nous avons récemment pu démontrer quelles étaient les causes des changements survenus dans les communautés de daphnies. Nous avons élevé des clones des deux espèces issus de différents lacs dans des bacs contenant une eau riche ou pauvre en nutriments [4] et nous avons observé que *Daphnia longispina* prospérait dans les conditions de faible abondance typiques des lacs oligotrophes (pauvres en nutriments) tandis que les conditions eutrophes étaient particulièrement favorables à *Daphnia galeata*. Ceci explique pourquoi *Daphnia longispina* n'a pas été évincée de tous les lacs suisses : dans les sédiments des rares lacs relativement

Fig. 2: La composition spécifique des communautés de daphnies s'est modifiée suite à l'enrichissement du milieu en phosphore.





Eawag

Prélèvement d'une carotte sédimentaire dans le lac de Greifen : L'étude des œufs de résistance conservés dans les sédiments permet de déterminer les espèces de daphnies qui étaient présentes dans le lac à différentes époques et de retracer l'évolution de leur fréquence en fonction de la concentration de phosphore.

épargnés par l'eutrophisation, nous n'avons découvert que très peu d'éphippies de *Daphnia galeata*. Cette espèce était ainsi pratiquement absente du lac de Brienz, le plus propre de Suisse, alors qu'elle était présente dans le lac de Thoun voisin. Nos études ont même montré qu'avant 1950, le lac de Brienz ne présentait pas de population permanente de daphnies. Ce n'est qu'à la suite des apports, relativement modérés, de phosphore, qu'une population de *Daphnia longispina* a pu s'établir durablement.

Le même phénomène de disparition et d'hybridation des espèces suite à l'eutrophisation a été observé par d'autres scientifiques de l'Eawag chez les poissons. Pascal Vonlanthen et Ole Seehausen du département Ecologie et évolution des poissons ont récemment pu démontrer avec une équipe de l'Université de Berne que la fertilisation excessive des lacs suisses avait conduit en quelques décennies à une érosion de 38 pour cent de la diversité des espèces de corégones autochtones [5]. Plus les concentrations de phosphore atteintes dans les lacs étudiés

étaient élevées, plus le nombre d'espèces disparues était important (Fig. 3A).

Sept lacs suisses, le Léman et les lacs de Morat, de Sempach, de Baldegg, de Hallwil, de Greifen et de Pfäffikon, ont aujourd'hui perdu la totalité de leurs corégones d'origine, remplacés par d'autres espèces introduites par mesure de repeuplement. Les lacs profonds et peu touchés par l'eutrophisation comme ceux de Thoun, de Brienz et des Quatre-Cantons sont les seuls à ne déplorer aucune disparition d'espèce. Dans les lacs de Walenstadt et de Zurich, les chercheurs ont pu retrouver deux des trois espèces recensées avant l'eutrophisation, leur succès étant de quatre sur cinq au lac de Constance. L'étude a également montré qu'au moins 25 lacs de l'Arc alpin abritaient des espèces endémiques de corégones, c'est-à-dire des espèces vivant dans un lac à l'exclusion de tout autre.

L'érosion de la biodiversité chez les corégones est notamment due à un phénomène de croisement entre espèces originaires indépendantes qui a donné lieu à des descendants fertiles. Suite aux apports massifs de phosphore dans les lacs de 1950 à 1990, les couches profondes de beaucoup d'entre eux se sont trouvées privées d'oxygène et la niche écologique des spécialistes qui avaient évolué depuis la fin de la dernière période glaciaire pour s'adapter à la vie en grande profondeur a disparu. Les lacs profonds et oligotrophes semblent offrir des conditions particulièrement propices à l'apparition de nouvelles espèces. La disparition des habitats profonds a poussé les espèces qui les peuplaient à remonter vers des zones occupées par d'autres espèces avec lesquelles elles ont fini par se croiser. En l'espace de quelques générations, ces spécialistes ont ainsi perdu leur intégrité génétique et fonctionnelle. Ce phénomène est en quelque sorte une inversion de la spéciation, une déspeciación. Dans les lacs enrichis en phosphore, les différences génétiques entre les espèces restantes sont en conséquence beaucoup plus faibles que dans les lacs restés pauvres (Fig. 3b). Les corégones ont ainsi perdu une partie de leurs adaptations à des conditions spécifiques pour la reproduction ou l'alimentation et leur diversité morphologique s'est estompée.

Retour au « bon » vieux temps ? Les recherches sur les daphnies et les corégones montrent de manière édifiante qu'un enrichissement même modeste des lacs peut être nuisible aux écosystèmes naturels en modifiant la composition de la biocénose, en réduisant les différences génétiques entre espèces et en causant la disparition de certaines d'entre elles. Elles révèlent d'autre part que les dommages causés peuvent être irréversibles. Ainsi, les corégones endémiques qui ont disparu des lacs eutrophisés ne renaîtront pas même si les conditions trophiques naturelles sont rétablies. Il en va de même de la forme d'origine de *Daphnia longispina*.

Grâce à la stratégie de lutte évoquée plus haut, les teneurs en phosphore ont à nouveau baissé dans la plupart des lacs suisses au cours des trente dernières années. Dans les lacs les plus propres comme ceux de Brienz, de Walenstadt ou des Quatre-Cantons, la teneur en phosphates est aujourd'hui inférieure à 5 µg/l (Fig. 1). C'est une grande réussite en matière de protection

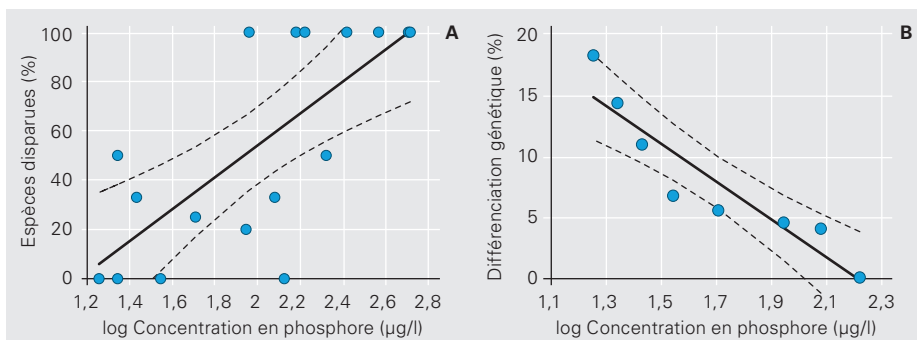


Fig. 3 : Le nombre d'espèces de corégones disparues dans un lac est d'autant plus important (A) et les différences génétiques entre les populations d'autant plus faibles (B) que la concentration en phosphore dans le milieu est élevée.

des eaux. L'idée avancée par les milieux de la pêche de reconsidérer l'élimination des matières nutritives en bordure de ces lacs risque maintenant de compromettre ce succès.

Les pourfendeurs de cette idée proposent par exemple de maintenir les teneurs en phosphates du lac de Brienz entre 2 et 5 µg/l, ce qui le replacerait dans la situation des années 1970. D'après eux, une telle mesure rétablirait dans le lac un niveau de croissance écologiquement satisfaisant chez les poissons et la végétation aquatique. Pendant cette période de richesse en nutriments, les pêcheurs professionnels captureraient en effet en moyenne 15 kg de corégones par ha et par an dans le lac alors que ce rendement est aujourd'hui inférieur à 1 kg/ha-an [6]. Les initiateurs y voient un effet indéniable de l'appauvrissement du lac. Dans l'espoir de stimuler la croissance algale et donc de faire remonter les rendements de la pêche, ils demandent l'arrêt ou la réduction de la déphosphatation dans les stations d'épuration du bassin versant du lac de Brienz. Ils espèrent d'autre part qu'une augmentation des apports de nutriments enrayera la régression des populations de daphnies observées de façon récurrente depuis 1999 et donc rétablira la principale source de nourriture des corégones dans le lac.

Alors que les daphnies ont constitué la principale source de nourriture des corégones pendant les 30 dernières années, nous n'avons cependant pas retrouvé d'œufs de résistance dans les sédiments lacustres datant d'avant 1950. L'absence de daphnies est également mentionnée dans les études relativement anciennes du plancton du lac de Brienz [7]. Ces observations indiquent que les corégones endémiques subsistaient probablement sans apports réguliers de daphnies. La régression récurrente des populations de daphnies que nous observons à nouveau de nos jours est donc le signe d'un retour à la normale de l'écosystème lacustre et ne doit pas être perçue comme une menace pour les corégones.

Moins de prises mais plus d'espèces endémiques. Un inventaire des espèces de poissons du lac de Brienz effectué à l'automne 2011 dans le cadre du projet Lac codirigé par l'Eawag et le Musée d'histoire naturelle de Berne a révélé que ses couches les plus profondes abritaient des populations de corégones capables de reproduction naturelle. Les faibles rendements de la pêche professionnelle dans le lac ne sont en effet pas uniquement le reflet d'un manque de poissons. A en croire les statistiques

de l'Inspection bernoise de la pêche, il semblerait que l'effort de pêche ait continuellement chuté depuis la fin des années 1970 pour n'atteindre aujourd'hui qu'un cinquième de ce qu'il était alors. Les statistiques non normées des rendements de la pêche professionnelle donnent donc une image déformée de la réalité.

Au vu de tous ces éléments, la nouvelle stratégie proposée pour la gestion du phosphore n'a plus de raison d'être. Fertiliser un lac naturel de manière artificielle équivaldrait à le considérer comme une simple pisciculture, ce qui serait absolument contraire à tout principe de gestion durable des ressources naturelles. La Suisse compte déjà de nombreux lacs productifs riches en matières nutritives. Il est de notre devoir de préserver la qualité et la biodiversité unique des quelques lacs oligotrophes dont elle dispose. D'autant plus que, forts de l'expérience de ces 80 dernières années, nous savons aujourd'hui quelles pourraient être les conséquences écologiques de nos actes. ○ ○ ○

- [1] Gestion des phosphates dans le lac de Brienz: 11.4091 Motion déposée par le Conseiller aux Etats Werner Luginbühl; 11.4158 Motion déposée par le Conseiller national Erich von Siebenthal.
- [2] Brede N., Sandrock C., Straile D., Jankowski, T., Spaak, P., Streit B., Schwenk K. (2009): The impact of human-made ecological changes on the genetic architecture of *Daphnia* species. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106, 4758–4763.
- [3] Rellstab C., Keller B., Girardclos S., Anselmetti F., Spaak, P. (2011): Anthropogenic eutrophication shapes the past and present taxonomic composition of hybridizing *Daphnia* in unproductive lakes. Limnology and Oceanography 56, 292–302.
- [4] Spaak P., Fox J.A., Hairston Jr. N.G. (2012): Modes and mechanisms of a *Daphnia* invasion. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B, online veröffentlicht.
- [5] Vonlanthen P., Bittner D., Hudson A.G., Young K., Müller R., Lundsgaard-Hansen B., Roy D., Di Piazza S., Largiadèr C.R., Seehausen O. (2012): Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. Nature 482, 357–362.
- [6] Eawag (2012): Faits et chiffres sur la question du phosphore dans le lac de Brienz, www.eawag.ch/phosphor_brienzersee
- [7] Flüch H. (1926): Beiträge zur Kenntnis des Phytoplanktons des Brienzersees. Dissertation ETH Zürich.

Perturbateurs endocriniens : détecter, évaluer, éliminer



Inge Werner, biologiste, est directrice du Centre Ecotox de l'Eawag et de l'EPFL.

Coauteurs : Cornelia Kienle, Petra Kunz, Étienne Vermeirssen, Robert Kase

Les hormones et substances apparentées qui sont le plus souvent rejetées dans les lacs et rivières avec les effluents urbains peuvent nuire à la faune aquatique. L'écotoxicologie dispose de tests qui facilitent la détection et l'évaluation de ces polluants et aident à décider des stratégies de dépollution à mettre en œuvre en permettant, par exemple, de juger de l'efficacité des traitements complémentaires d'épuration.

Grande fut la surprise d'une équipe de chercheurs anglais lorsqu'ils découvrirent au début des années 1990 la présence répétée de poissons présentant à la fois des caractères sexuels mâles et femelles dans les cours d'eau (Fig. 1). Quelle pouvait être la cause de ce phénomène dit d'intersexualité ? Les anomalies étaient particulièrement fréquentes en aval des stations d'épuration dont les effluents étaient peu dilués dans le milieu récepteur. En analysant ces effluents, on constata qu'ils contenaient des substances qui pouvaient féminiser les poissons mâles en agissant sur eux à la manière d'œstrogènes [1].

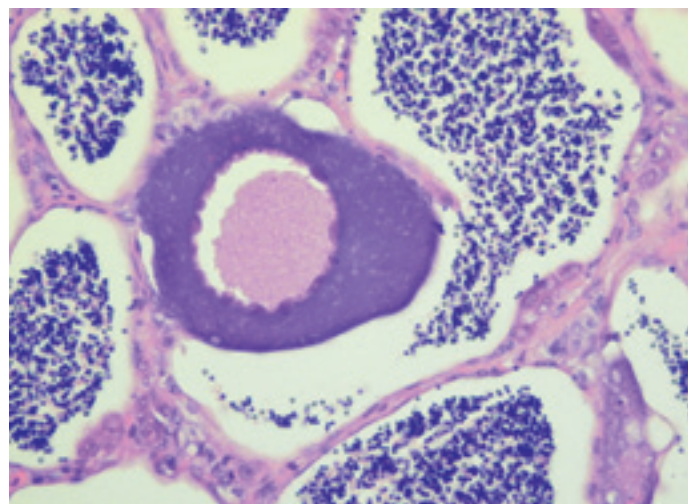
En plus des œstrogènes naturels d'origine humaine ou animale, de nombreuses substances synthétiques peuvent présenter des propriétés œstrogéniques. C'est par exemple le cas de l'éthinylestradiol contenu dans la pilule contraceptive ou du bisphénol A utilisé dans la fabrication de nombreux plastiques. Ces composés agissent de la même manière que les hormones sexuelles femelles et peuvent les imiter ou, en les concurrençant, bloquer leur activité. Les substances œstrogéniques perturbent le développement, la reproduction et la santé des animaux aqua-

tiques et surtout des poissons qui sont particulièrement sensibles en raison de la grande similitude de leur système hormonal avec celui de l'homme. Une autre particularité de ces substances est d'être toxique à des concentrations extrêmement faibles – moins d'un nanogramme par litre soit l'équivalent d'un litre de produit dans le lac de Bienne –, ce qui les classe dans la catégorie des micropolluants.

La Suisse aussi est concernée. Les substances à activité hormonale, ou perturbateurs endocriniens, peuvent rejoindre le milieu aquatique de différentes façons mais leur principale voie de rejet est aujourd'hui l'assainissement communal car les micropolluants ne sont que très partiellement éliminés dans les stations d'épuration. Les travaux réalisés dans le cadre du projet Fischnetz ont montré que les substances œstrogéniques étaient en partie responsables de la perte de plus de 60 pour cent des effectifs de truites enregistrée en Suisse depuis le début des années 1980. De 2002 à 2007, un programme national de recherche a été dédié aux perturbateurs endocriniens (PNR 50) pour évaluer le risque environnemental qu'ils représentent. Les travaux ont révélé que les concentrations d'œstrogènes étaient nettement plus élevées en aval des stations d'épuration qu'en amont (Fig. 2). D'autre part, des quantités anormales de vitellogénine ont été observées chez certaines truites arc-en-ciel mâles [2]. Or la présence de cette protéine chez les mâles est un signe de pollution œstrogénique étant donné que ce précurseur de la vitelline, protéine des ovocytes, n'est normalement synthétisé que par les femelles à maturité sexuelle. Le PNR 50 conclut notamment que :

- Les perturbateurs endocriniens posent un problème en Suisse dans les cours d'eau assurant une trop faible dilution des effluents d'épuration qu'ils accueillent.
- L'efficacité des stations d'épuration suisses doit être évaluée et des solutions doivent être proposées pour les optimiser si nécessaire.
- La mise au point de méthodes standardisées pour la détection des substances œstrogéniques et pour l'évaluation de la qualité de l'eau doit être encouragée.
- Des critères de qualité environnementale doivent être définis sur des bases scientifiques pour permettre aux gestionnaires

Fig. 1 : Tissus testiculaires de gardon mâle du lac Léman vus en coupe : au centre, un ovocyte.



Daniel Bernet

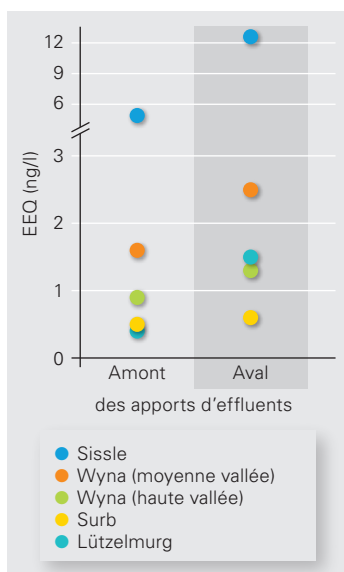


Fig. 2: Teneurs moyennes en substances œstrogéniques dans plusieurs rivières suisses en amont et en aval du point de rejet d'effluents de stations d'épuration. L'étude a été menée en 2004 et les rejets dans la Sissle ont été fortement réduits depuis. Les concentrations sont exprimées en équivalents-œstrogène (EEQ).

d'évaluer la contamination hormonale des eaux dont ils ont la charge et ces critères doivent être intégrés à la législation sur la protection des eaux.

Avec la complicité de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), de l'Eawag et d'autres partenaires, le Centre Ecotox s'est attelé, ces dernières années, à répondre à certaines de ces exigences.

Quatre étapes pour évaluer la qualité des eaux. Même si le PNR50 avait montré que certains cours d'eau risquaient de présenter des teneurs critiques en œstrogènes et pseudo-œstrogènes en aval des stations d'épuration, on ne disposait pas de méthode scientifiquement éprouvée pour évaluer le degré de contamination des eaux par ce type de micropolluants. Pour combler cette lacune, nous nous sommes associés à l'Eawag dans le cadre du projet Stratégie Micropoll pour élaborer, sur mandat de l'OFEV, un système d'évaluation de la qualité de l'eau axé sur les micropolluants organiques [3]. Sur la foi de données de toxicité et d'occurrence, 47 substances ont tout d'abord été sélectionnées pour représenter les micropolluants susceptibles d'être rejetés par les systèmes d'assainissement communal suisses. Cette liste de composés représentatifs comporte divers médicaments, pesticides et produits industriels mais aussi huit perturbateurs endocriniens. Pour évaluer l'écotoxicité de ces substances, nous avons défini des critères de qualité environnementale, c'est-à-dire des concentrations ne devant pas être dépassées dans l'environnement aquatique pour que celui-ci ne subisse pas de dommages. Pour les calculer, nous nous sommes servis de données de toxicité aiguë et chronique obtenues sur des algues, des invertébrés et des poissons.

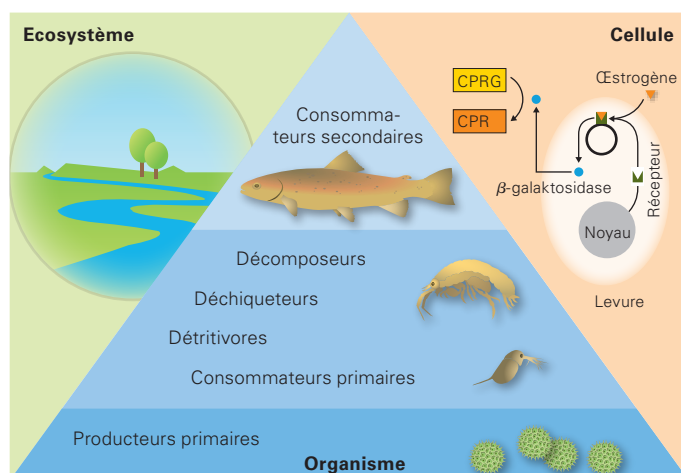
Le système d'évaluation propose une démarche en quatre étapes: Dans un premier temps, les cours d'eau potentiellement contaminés sont identifiés à partir du degré de dilution des effluents d'épuration dans le milieu récepteur. Le degré de pollution est ensuite déterminé par analyse chimique sur les sites

sensibles. Dans une troisième étape, la gravité de cette pollution est évaluée en comparant les concentrations mesurées dans l'environnement aux critères de qualité environnementale définis pour les micropolluants dosés. Suivant l'importance du dépassement, une classe de qualité est attribuée au cours d'eau selon un système à cinq niveaux. La dernière étape consiste à identifier les principales causes de contamination sur les sites touchés et à proposer des stratégies de dépollution. Ce système d'évaluation permet donc de localiser les secteurs de cours d'eau présentant des teneurs critiques en micropolluants et d'identifier les stations d'épuration devant être optimisées pour améliorer leur élimination.

Comment réduire les rejets de micropolluants? Des traitements complémentaires peuvent être mis en œuvre dans les stations d'épuration pour augmenter leur capacité d'élimination des micropolluants et en particulier des perturbateurs endocriniens. Deux techniques ont été étudiées sur pilote dans le cadre du projet Stratégie Micropoll: une ozonation suivie d'un traitement biologique d'une part et un traitement au charbon actif suivi d'une filtration de l'autre. Divers essais biologiques ont été mis en œuvre pour estimer l'efficacité des deux options de traitement (Fig. 3) et leurs qualités ont été évaluées pour les contrôles de routine effectués dans les stations d'épuration [4].

Deux types de biotests ont été utilisés: des essais *in vitro* et des essais *in vivo*. Les tests *in vitro* permettent une détection très sensible des effets des substances au niveau de mécanismes cellulaires spécifiques dans des lignées de cellules ou des organismes unicellulaires et se prêtent donc à la détection de certaines familles de composés chimiques comme les œstrogènes. Ils ne sont toutefois pas en mesure d'indiquer les effets des substances sur les organismes entiers. Les tests *in vivo*, de leur côté, sont effectués à l'échelle de l'organisme et s'intéressent aux effets sur les fonctions biologiques comme la croissance, la

Fig. 3: Dans le projet Stratégie Micropoll, les effets des micropolluants ont été étudiés à l'échelle de l'écosystème, de l'organisme et de la cellule. Plus le niveau d'organisation biologique est élevé, plus il est difficile d'attribuer les effets à des facteurs individuels.



survie, la reproduction ou la synthèse de vitellogénine. Ils appréhendent les effets de l'ensemble des substances présentes dans un échantillon mais ne donnent que très peu d'informations sur la nature des composés en présence.

Des échantillons d'eau usée ont été prélevés dans le pilote à différents stades de traitement puis analysés par voie chimique et biologique. Les tests *in vitro* ont montré que le traitement biologique déjà en place réduisait déjà considérablement la toxicité des effluents mais qu'il ne permettait pas d'éliminer totalement les polluants, comme en témoignait, notamment, l'œstrogénicité encore élevée des effluents à la suite de cette étape. D'après les tests *in vitro* un traitement consécutif au charbon actif ou à l'ozone permettait d'éliminer 80 pour cent des micropolluants restants. Ces résultats ont été confirmés par l'analyse chimique.

Du côté des essais *in vivo*, le test sur truites arc-en-ciel a lui aussi confirmé l'efficacité des traitements complémentaires, la moindre toxicité des effluents se traduisant par une augmentation du taux d'éclosion, du poids et de la survie des embryons. Les autres tests *in vitro* ont livré des résultats disparates en raison, notamment, d'un manque de sensibilité. L'étude comparative des différents essais biologiques utilisés montre qu'aucun test pris isolément n'est en mesure d'appréhender la totalité de la toxicité d'un échantillon. Pour contrôler l'efficacité d'élimination des micropolluants dans les stations d'épuration, les tests *in vitro* semblent toutefois mieux adaptés que leurs homologues *in vivo*. Ils sont d'autre part plus faciles à mettre en œuvre, ce qui les qualifie pour les analyses de routine.

Les essais avec les biotests ne se sont pas contentés de prouver que l'ozonation et le traitement au charbon actif permettaient d'éliminer une grande diversité de micropolluants organiques et de lutter contre la pollution des eaux par les perturbateurs endocriniens. Ils ont également indiqué que suite à l'ozonation suivie d'un traitement biologique, les effluents ne semblaient pas non plus contenir de produits de transformation stables susceptible d'être toxiques pour l'environnement. Pour limiter les risques de rejet de tels composés, l'étape d'ozonation doit être impérativement suivie d'un traitement biologique actif.

Comment mesurer et surveiller la pollution hormonale? Au vu de ces résultats, la Confédération a décidé d'équiper un certain nombre de stations clés de ces techniques d'épuration afin de protéger la vie aquatique et la qualité des ressources en eau potable. En collaboration avec divers partenaires, elle a élaboré en ce sens un modèle de financement basé sur le principe du pollueur-payeur. Les juristes travaillent actuellement à une modification de la loi sur la protection des eaux qui permettrait de l'appliquer.

Malgré l'optimisation des stations d'épuration, il reste indispensable de surveiller la qualité de l'eau et de contrôler régulièrement les teneurs en perturbateurs endocriniens. Etant donné que les (pseudo)œstrogènes agissent à des concentrations extrêmement faibles, leur dosage individuel n'est pas toujours possible avec les méthodes analytiques habituelles. D'autre part, les effets des substances présentant des modes d'action similaires ont tendance à se cumuler de sorte que le mélange de plusieurs œstro-

Peter Schönenberger



Cornelia Kienle et Petra Kunz du Centre Ecotox discutant des résultats d'un test d'œstrogénicité sur levures.

gènes présents à des concentrations individuelles inférieures au seuil de toxicité peut avoir un effet biologique significatif. Pour déterminer avec sensibilité l'effet global des substances œstrogéniques présentes dans le milieu, il est donc pertinent de compléter les analyses chimiques de tests *in vitro*.

Sur mandat de l'OFEV, nous travaillons actuellement avec les autorités fédérales, les services cantonaux de la protection des eaux, plusieurs équipes de recherche et divers bureaux d'étude à l'élaboration d'un système de surveillance de la qualité de l'eau basé sur l'utilisation des biotests en analyse de routine. Pour pouvoir être utilisés dans un tel contexte, les biotests doivent remplir certaines conditions: ils doivent être à la fois sensibles et spécifiques de la famille de composés recherchés, faciles à mettre en œuvre et bon marché.

Dans une première campagne de mesures, nous avons déterminé la teneur en composés œstrogéniques dans de nombreux cours d'eau suisses accueillant des quantités importantes d'effluents d'épuration sans pouvoir les diluer suffisamment. Pour ce faire, nous avons utilisé deux tests *in vitro* déjà largement éprouvés dans le cadre du projet Micropoll: le test YES et le test ER-Calux. Le test YES (yeast estrogen screen) est un test simple, bon marché et accessible qui indique les effets œstrogéniques grâce à des cellules de levure génétiquement modifiées dans lesquelles la fixation des substances au récepteur humain des œstrogènes a été couplée à une réaction colorimétrique. L'essai ER-Calux est un test du commerce qui fait appel à une lignée de cellules humaines porteuses d'un récepteur des œstrogènes modifié. Suite au travail qu'il demande avec les lignées cellulaires, l'ER-Calux est plus difficile à mettre en œuvre et plus onéreux que le test YES mais il est également beaucoup plus sensible.

Les deux types de tests peuvent être pareillement utilisés pour contrôler le non dépassement du critère de qualité envi-

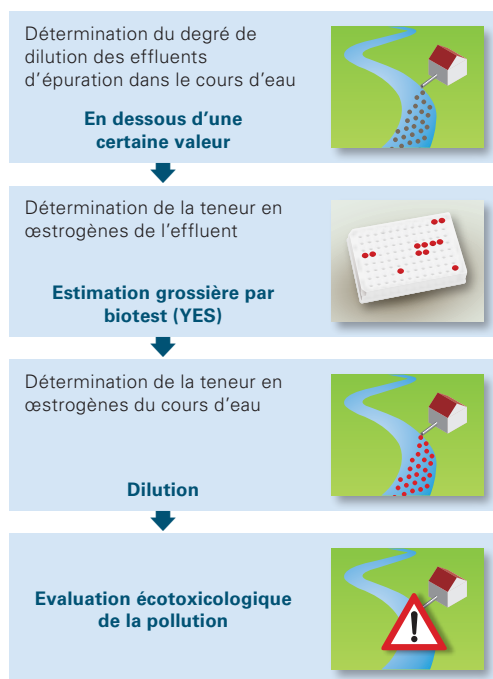


Fig. 4: Démarche envisageable pour évaluer le degré de pollution de l'eau par les perturbateurs endocriniens.

ronnementale fixé à 0,4 ng/l pour le 17 β -estradiol et qui sert de référence pour les œstrogènes dont les concentrations sont exprimées en équivalents estradiol par litre. Ce seuil correspond à la norme de qualité environnementale proposée par l'Union européenne et le Centre Ecotox pour l'application de la directive-cadre sur l'eau. Dans les cours d'eau étudiés, les deux tests ont indiqué une activité œstrogénique plus importante en aval des stations d'épuration qu'en amont tandis que l'analyse chimique ne permettait pas de caractériser entièrement la pollution œstrogénique.

Pour déterminer l'œstrogénicité des secteurs de cours d'eau chargés en effluents d'épuration, nous recommandons d'utiliser le test YES, plus pratique. L'activité peut être évaluée dans l'effluent par le biotest puis extrapolée au cours d'eau en appliquant le facteur de dilution dans le milieu récepteur (Fig. 4). Bien qu'il soit moins sensible que l'ER-Calux, le test YES donne de bons résultats avec les échantillons d'eau fortement polluée. Sa simplicité et son faible coût lui donnent un avantage décisif pour les analyses de routine.

Les méthodes et stratégies que nous avons utilisées sont prometteuses et nos études montrent que les essais biologiques se prêtent à l'évaluation des effets œstrogéniques dans les cours d'eau. Mais avant que les laboratoires cantonaux ou privés puissent les employer, ils doivent être validés et standardisés. Au sein du groupe Effets hormonaux/xénohormones de l'organisme allemand de normalisation DIN, nous travaillons actuellement à la préparation d'une certification ISO pour les biotests.

Beaucoup de questions en suspens. Bien que nous ayons déjà beaucoup appris sur les perturbateurs endocriniens, de nombreuses questions restent encore sans réponse. Ainsi, les corégones du lac de Thoune présentent depuis une dizaine d'années des malformations des organes génitaux. Malgré tous

nos efforts de recherche, toutes les techniques employées et tout notre savoir sur l'action des polluants chimiques, nous n'avons pas encore pu identifier les causes du phénomène [5]. De nouvelles études indiquent d'autre part que, non contents d'agir sur les fonctions reproductrices, les perturbateurs endocriniens pourraient affaiblir les défenses immunitaires des poissons et les rendre plus sensibles aux maladies [6]. Ces effets multiples rendent les prévisions à l'échelle de la population particulièrement difficiles et leur superposition avec ceux d'autres polluants et facteurs de stress compliquent encore la situation.

D'un autre côté, notre connaissance des effets écotoxiques ne cesse de s'améliorer et nous disposons de méthodes de criblage à haut débit de plus en plus performantes. Notre capacité à mesurer les effets endocriniens ou autres sur les organismes aquatiques augmente donc de jour en jour. L'inconvénient des techniques à haut débit, cependant, est de livrer des résultats à l'échelle moléculaire qu'il est extrêmement difficile d'extrapoler à l'échelle de l'organisme tout entier. Nous plaçons nos espoirs dans les méthodes dites «omiques» comme la transcriptomique, la protéomique ou la métabolomique qui permettent d'examiner simultanément la totalité des gènes, des protéines ou des métabolites de l'être étudié. Ces techniques pourraient nous aider à trouver les voies métaboliques qui mènent d'une perturbation cellulaire à un symptôme à l'échelle de l'organisme. Nous pourrions alors déterminer des biomarqueurs spécifiques qui pourraient ensuite être utilisés dans les analyses de routine. Si nous y parvenons, nous pourrions enfin limiter notre recours à l'expérimentation animale pour évaluer les risques pour l'homme et l'environnement et préserver les écosystèmes naturels. ○ ○ ○

- [1] Purdom C.E., Hardiman P.A., Bye V.J., Eno N.C., Tyler C.R., Sumpter J.P. (1994): Estrogenic effects of effluents from sewage treatment works. *Chemical Ecology* 8, 275–285.
- [2] Vermeirssen E.L.M., Burki R., Joris C., Peter A., Segner H., Suter M.J.-F., Burkhardt-Holm P. (2005): Characterization of the estrogenicity of Swiss midland rivers using a recombinant yeast bioassay and plasma vitellogenin concentrations in feral male brown trout. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24, 2226–2232.
- [3] Götz C.W., Kase R., Hollender J. (2010): Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Eawag-Studie im Auftrag des Bafu.
- [4] Kienle C., Kase R., Werner I. (2011): Evaluation of bioassays and wastewater quality – *In vitro* and *in vivo* bioassays for the performance review in the project Strategy Micropoll. Oekotoxzentrum, Eawag/EPFL.
- [5] Bernet D., Liedtke A., Bittner D., Eggen R.I.L., Kipfer S., Küng C., Largiadèr C.R., Suter M.J.-F., Wahli T., Segner H. (2008): Gonadal malformations in whitefish from Lake Thun – Defining the case and evaluating the role of EDCs. *Chimia* 62, 383–388.
- [6] Casanova-Nakayama A., Wenger M., Burki R., Eppler E., Krasnov A., Segner H. (2011): Endocrine disrupting compounds – Can they target the immune system of fish? *Marine Pollution Bulletin* 63, 412–416.

Pas de diagnostic sans état de référence

Pour Pascal Vonlanthen et Florian Altermatt de l'Eawag, les programmes de monitoring à long terme sont indispensables à la préservation de la biodiversité et de ses services écosystémiques. Vonlanthen étudie l'évolution des poissons dans les lacs suisses et coordonne actuellement les travaux d'inventaire de la biodiversité piscicole effectués dans le cadre du Projet Lac. Altermatt s'intéresse à la dissémination et à la différenciation des macro-invertébrés le long des cours d'eau.

Interview : Andri Bryner

Pourquoi faut-il surveiller la biodiversité ?

Florian Altermatt (FA) Les scientifiques étudient la nature depuis des siècles. Mais dans la plupart des cas, nous ne savons toujours pas, en 2012, quel était l'état d'origine des objets ou systèmes que nous étudions. Sans monitoring, nous passons à côté de l'instant zéro des travaux futurs.

Pascal Vonlanthen (PV) Et lorsque des données sur le passé existent, elles ont rarement été collectées de façon organisée et systématique et sont donc souvent hétérogènes. Il est donc difficile de les comparer avec les séries de données actuelles et de ce fait, quasiment impossible de livrer un diagnostic fiable sur l'évolution du système.

La biodiversité n'est pas un luxe. La nature nous rend des services inestimables.

(FA) On ne demande pas non plus à la recherche de collecter les données démographiques sur les naissances, les mariages ou l'immigration. C'est l'affaire de l'Etat. D'autre part, les ambitions de la recherche ont changé elle ne se contente plus de décrire le monde existant. Plus personne ne la financerait pour ça. En 1958, David Keeling a commencé à mesurer le taux de CO₂ sur le Mauna

Loa de sa propre initiative. Il a collecté des données pendant des années avant de recevoir son premier financement. Aujourd'hui, sa chronique est un des piliers de la recherche sur le climat. Mais il n'est pas certain qu'il se trouve toujours quelque part un chercheur courageux et visionnaire qui fasse le travail. L'Etat ne devrait pas se reposer là-dessus.

Est-ce vraiment à la Confédération de s'en charger ?

(PV) Les scientifiques cherchent à appréhender la diversité des espèces, une grande inconnue. La surveillance environnementale enregistre les modifications du monde connu. Le rôle de la recherche est de comprendre pourquoi et comment ces modifications se produisent, de comprendre le fonctionnement de la nature. Les chercheurs ont rarement le temps et les moyens logistiques, financiers et humains de faire du monitoring. Mais il est vrai que la recherche a un besoin vital des données de surveillance.

Une entrevue avec Pascal Vonlanthen (g.) et Florian Altermatt sur l'importance du monitoring.



Fotos: Andri Bryner

Mais, tout d'abord, qu'est-ce pour vous que la biodiversité ?

(FA) Pour moi, biodiversité est synonyme de variation et de particularité. Je ne veux pas toujours manger ou voir la même chose. En vacances, c'est la diversité qui nous attire, nous préférons une prairie en fleurs à un champ de maïs monochrome.

(PV) Oui, la biodiversité, c'est beau mais ce n'est pas pour autant un luxe. La nature nous rend des services inestimables : de l'eau pour boire, de l'air pour respirer etc. Tout cela dépend de la biodiversité. Dans mon domaine de recherche, c'est bien simple, si la chaîne alimentaire ne fonctionne plus, les pêcheurs n'attrapent plus de poisson, point.

(FA) D'accord. Mais en même temps, la notion de service écosystémique peut être dangereuse. Car l'eau potable, par exemple, peut également être obtenue par des moyens techniques. Nous devons montrer et expliquer que les milieux aquatiques et les organismes qui y vivent sont reliés entre eux par des relations complexes et que leur bon état signifie autrement plus que de l'eau potable.

Et comment mesure-t-on cette diversité ?

(PV) En général, on procède à la détermination des individus observés ou capturés pour ensuite enregistrer la fréquence ou la biomasse de chaque espèce. La classification des animaux et végétaux en espèces est née du besoin de l'homme de tout ranger en catégories. Dans la nature, les frontières ne sont pas toujours aussi nettes et l'évolution des espèces se fait souvent

de manière continue. Dans nos projets, nous essayons d'appréhender la biodiversité sous toutes ses formes, celle des formes, des couleurs et des modes de vie, mais aussi celle des caractères génétiques. C'est cette dernière qui permet aux espèces d'en former de nouvelles ou de s'adapter aux conditions environnementales.

(FA) L'important pour le monitoring, c'est qu'il se fasse dans la durée à partir d'observations répétées et que les méthodes utilisées ne changent pas à chaque fois, que les pêches de contrôle soient par exemple effectuées avec des filets standardisés.

Les projets de surveillance lancés par des initiateurs isolés sont généralement centrés sur leur propre domaine d'intérêt et leur horizon habituel – lieu de travail ou de villégiature – au lieu de livrer des données utilisables pour toute la Suisse.

Combien de temps un programme de monitoring doit-il durer ?

(FA) On considère en général qu'un programme de surveillance doit s'étendre sur au moins un ou deux cycles de développement de l'espèce concernée pour avoir au moins une référence et un changement. Mais bien entendu, l'analyse devient d'autant plus détaillée et pertinente que la collecte d'informations se poursuit. A mesure que les séries s'allongent, les données de surveillance environnementale collectées par les organismes publics et mises à la disposition de tous motivent de plus en plus de projets de recherche qui, soit dit en passant, n'ont plus à être financés par les programmes de monitoring.

Comment utilisez-vous, de votre côté, les données de surveillance ?

(FA) Dans mes projets, je cherche notamment à savoir comment les espèces se disséminent le long des cours d'eau et comment les obstacles physiques aux déplacements influent sur leur différenciation. Mes conclusions doivent être valables pour toute la Suisse, ce qui n'est possible que grâce aux données du MBD (Monitoring de la biodiversité en Suisse). Nous les complétons ensuite avec nos propres analyses, notamment en génétique.

(PV) Dans mon cas, les données disponibles sur les poissons proviennent malheureusement pour la plupart de statistiques de pêche. Elles livrent donc une image biaisée des populations piscicoles puisqu'elles ne concernent que les espèces convoitées par les pêcheurs. C'est la raison pour laquelle nous avons lancé notre propre monitoring dans le cadre du Projet Lac en nous référant aux méthodes éprouvées recommandées par l'Union européenne. Mais notre récente étude sur la disparition des espèces de corégones n'aurait pas vu le jour si un enseignant n'avait pas eu l'idée, il y a plus

de 50 ans, de faire un inventaire des corégones de Suisse et d'en faire une description détaillée.

Comment l'Eawag est-il impliqué dans le monitoring de la biodiversité ?

(FA) L'Eawag a coopéré à la définition des nouveaux indicateurs pour les cours d'eau : éphémères, plécoptères et trichoptères. A l'avenir, la biosurveillance s'intéressera de plus en plus à la qualité et au fonctionnement des écosystèmes. Dans ce domaine, nous pouvons nous appuyer sur d'anciens travaux pour définir de nouveaux indicateurs portant sur les fonctions des écosystèmes comme la dégradation des litières par exemple.

(PV) Les données recueillies dans le cadre du Projet Lac seront mises à la disposition du public et nous espérons que de plus en plus de cantons viendront nous rejoindre. Notre inventaire des poissons des lacs suisses bénéficierait alors d'une meilleure assise et livrerait une référence solide pour tout le pays. Il est primordial d'inclure les lacs dans l'observation systématique des peuplements piscicoles. C'est la seule façon d'éviter la disparition des espèces.

Lors de la journée d'info 2012 de l'Eawag, Pascal Vonlanthen du département Ecologie et évolution des poissons et Florian Altermatt du département d'Ecologie aquatique ont débattu du monitoring de la biodiversité avec la conseillère nationale Franziska Teuscher. L'entretien d'une demi-heure est disponible en vidéo sur www.eawag.ch/infotag.

Le monitoring, élément central de la stratégie de la biodiversité

En avril 2012, le Conseil fédéral a adopté la Stratégie Biodiversité Suisse. D'ici 2014, un plan d'action doit être élaboré dans une démarche participative incluant cantons, communes, entreprises et particuliers pour atteindre les objectifs fixés d'ici 2020. L'un des dix objectifs stratégiques définis est d'étendre le système de monitoring actuel à tous les niveaux de la biodiversité, c'est-à-dire, aussi bien à celui des écosystèmes qu'à celui des espèces et des gènes. La Confédération souhaite par ailleurs introduire des indicateurs portant sur les fonctions des écosystèmes, par exemple la capacité d'autoépuration d'un cours d'eau ou les fonctions protectrices d'une forêt.

Téléchargement de la « Stratégie Biodiversité Suisse » (d, f, i) : www.bafu.admin.ch/publikationen

Le programme Monitoring de la Biodiversité en Suisse (MBD) est l'un des nombreux programmes d'observation de l'environnement mis en place par la Confédération. Lancé en 2001, il recense de façon standardisée plantes vasculaires, mousses, mollusques, oiseaux nicheurs et papillons de jour sur un réseau de plus de 2000 stations réparties sur toute la Suisse. Depuis 2010, son pool d'indicateurs compte également les éphémères, les plécoptères et les trichoptères pour rendre compte de la biodiversité des cours d'eau. Le MBD a fait le choix d'observer des espèces courantes dans des paysages normaux. Il vient ainsi compléter d'autres programmes de surveillance axés sur des espèces rares et généralement emblématiques. www.biodiversitymonitoring.ch

Prévoir la présence des organismes dans les rivières

La macrofaune invertébrée des rivières est constituée d'une multitude d'espèces privilégiant les habitats les plus divers. L'Eawag travaille à l'élaboration d'un modèle prédictif de la composition des assemblages du fond des cours d'eau qui devrait pouvoir être utilisé dans le cadre d'une politique de gestion intégrée pour prévoir l'impact potentiel de différents types d'interventions ou les effets du changement climatique.



Nele Schuwirth, hydrogéologue, travaille au département Analyse des systèmes et modélisation de l'Eawag au développement de modèles écologiques et à l'élaboration de méthodes facilitant la prise de décision en matière de gestion environnementale.
Coauteur : Peter Reichert

Dans les décennies à venir, les conditions de vie dans les rivières vont évoluer suite au réchauffement climatique et aux modifications de l'emprise des populations humaines sur les espaces naturels. Tandis que les changements climatiques vont induire un réchauffement des eaux et perturber les régimes d'écoulement, l'évolution démographique et économique de nos sociétés va modifier les rejets de polluants émanant des activités agricoles et industrielles, des ménages et des transports. Toutes ces mutations auront très certainement une influence sur les écosystèmes aquatiques et leurs biocénoses mais on ignore encore largement de quelle nature et de quelle ampleur seront les perturbations. La modélisation numérique permet de représenter les processus qui se déroulent dans les milieux d'eau courante et de décrire leur évolution en fonction des facteurs, notamment écologiques,

qui les influencent. Elle peut donc également prédire l'impact de modifications futures de ces facteurs sur les écosystèmes. En prenant l'exemple de la modélisation des communautés de macroinvertébrés, nous nous proposons dans cet article de montrer comment et avec quelles difficultés se construisent les modèles prévisionnels et comment sont gérées les incertitudes.

Le rôle fondamental des macroinvertébrés dans le milieu aquatique. On regroupe sous le terme de macroinvertébrés la partie de la faune invertébrée qui est visible à l'œil nu. Ce grand groupe est donc composé d'organismes très divers comme des larves d'insectes, des micro-crustacés, des mollusques ou autres sangsues. Evoluant généralement à la surface ou à l'intérieur du lit des rivières, ils remplissent des fonctions écologiques de premier ordre : ils assurent ainsi la fragmentation des feuilles mortes et débris végétaux apportées au cours d'eau qui seront ensuite décomposées par d'autres organismes, ils filtrent les particules organiques contenues dans l'eau et broutent la végétation algale. Ils forment d'autre part un maillon essentiel de la chaîne alimentaire et servent par exemple de nourriture à la truite commune.

Les macroinvertébrés sont par ailleurs des organismes fascinants qui contribuent fortement à la biodiversité des cours d'eau. Les différentes espèces se sont adaptées aux conditions écologiques les plus diverses. Certaines exigent ainsi des eaux très pures tandis que d'autres supportent très bien de fortes charges en matière organique ou résistent aux pesticides. Certaines affectionnent les zones de courant tandis que d'autres privilégient les eaux calmes. D'autres encore sont généralistes et s'adaptent à différents types de milieux. De même, les modes d'alimentation varient entre les différents groupes de macroinvertébrés. On distingue ainsi les brouteurs qui se nourrissent des algues se développant sur le substrat, les collecteurs filtreurs et mangeurs de sédiments qui récupèrent la matière organique contenue dans l'eau et les alluvions, les déchetueurs qui fragmentent les feuilles mortes et débris végétaux, les prédateurs qui se nourrissent d'autres invertébrés et, finalement, les omnivores.

Les macroinvertébrés présents dans un ruisseau changent en fonction de ses caractéristiques physiques et de son état écologique.



Mark Honti

Les gestionnaires des cours d'eau s'intéressent aux macro-invertébrés benthiques pour deux raisons principales. Tout d'abord, pour leur implication fondamentale dans les services rendus par les écosystèmes aquatiques en matière d'autoépuration, de récréation ou de pêche. Ensuite, pour leur rôle de bioindicateurs de la qualité de l'eau ou de la dégradation anthropogénique de l'environnement, rôle qu'ils doivent à leurs exigences spécifiques par rapport au milieu. Ces qualités en font un auxiliaire de valeur pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau mis à profit, notamment, dans le système modulaire gradué suisse (www.modul-stufen-konzept.ch).

Prédiction des effets sur les espèces. Pour prévoir l'effet d'une renaturation ou de l'optimisation d'une station d'épuration sur la qualité écologique d'un cours d'eau, il est donc utile de prédire son influence sur la faune macroinvertébrée. Dans le cadre du projet iWaQa du programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (www.nfp61.ch), nous travaillons dans une telle optique à l'élaboration et à l'optimisation de méthodes prédictives adaptées.

Dans un précédent projet, nous avons déjà développé un modèle appelé Erimo (Ecological river model) qui, partant d'une classification des macroinvertébrés en groupes fonctionnels définis en fonction de leurs modes d'alimentation, décrivait l'évolution de la fréquence ou de la biomasse des différents groupes dans le temps en fonction du débit et de la température [1–2]. Ce modèle convient parfaitement à l'étude de l'évolution des communautés d'invertébrés et de leurs activités fonctionnelles dans l'écosystème fluvial (comme le broutage des algues ou la fragmentation des débris végétaux par exemple) mais ne rend pas compte d'autres facteurs indispensables à l'évaluation de l'état écologique d'un cours d'eau comme la biodiversité ou la présence d'espèces particulièrement sensibles. Le nouveau modèle Streambugs 1.0 va plus loin et intervient au niveau des différents groupes taxonomiques (espèce, genre ou famille selon les don-

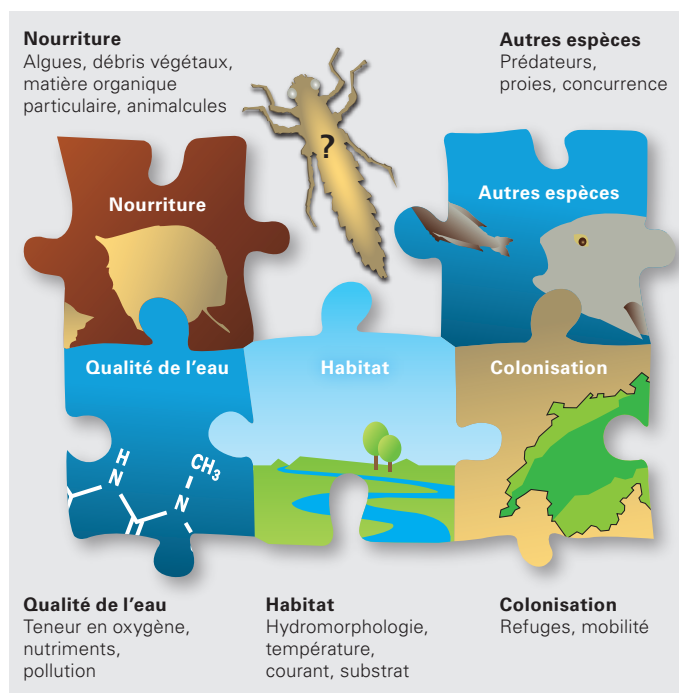


Fig. 1 : La présence ou l'absence d'une espèce donnée dans un milieu donné dépend d'une multitude de facteurs.

nées disponibles) [3]. En contrepartie, la dynamique temporelle n'est plus décrite de façon détaillée. Pour le moment, le modèle rend compte de l'occurrence d'une espèce donnée à un endroit donné en termes de présence/absence ; la prédiction d'une évolution temporelle de la fréquence ou de la biomasse des différents taxons reste en principe possible mais au prix d'études complémentaires et, éventuellement, d'un perfectionnement du modèle.

La présence ou l'absence d'une espèce donnée à un endroit donné dépend de nombreux facteurs, en particulier écologiques

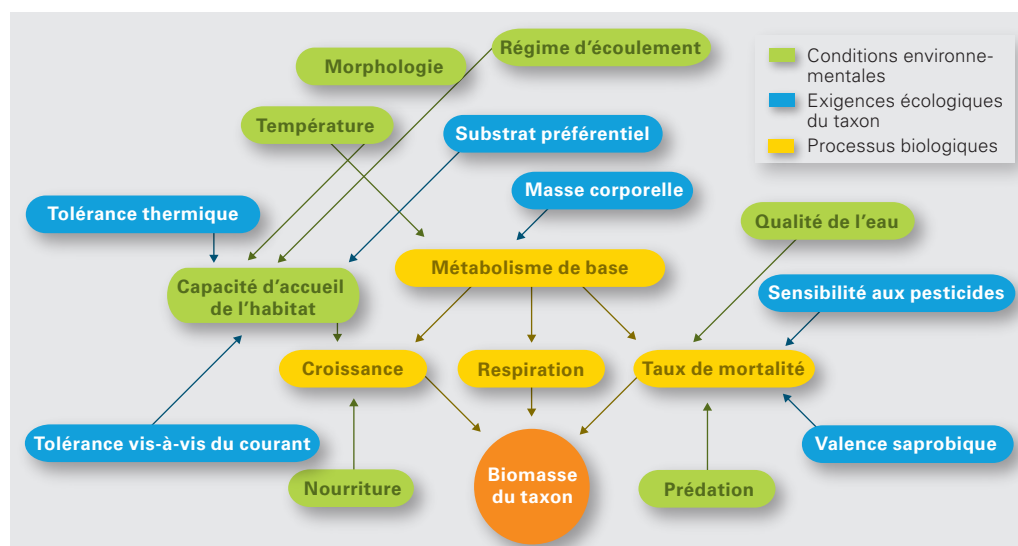


Fig. 2 : Le modèle Streambugs 1.0 se base sur les processus et facteurs d'influence pour simuler l'occurrence d'un taxon dans une station en terme de présence/absence ou d'augmentation/diminution de sa biomasse. La capacité d'accueil de l'habitat correspond au nombre maximal d'individus que peut abriter un habitat donné. La valence saprobique indique la tolérance d'une espèce vis-à-vis de la pollution organique.

(Fig. 1). En faisant varier ces facteurs, notre modèle effectue une simulation des principaux processus qui président à la présence des taxons ou à la variation de leur biomasse : croissance par prise de nourriture et reproduction d'un côté, respiration (transformation de la biomasse corporelle en énergie) et mort de l'autre. L'intensité de ces processus dépend du métabolisme de base des organismes, c'est à dire de leurs besoins énergétiques au repos, des conditions environnementales et des exigences spécifiques des différents taxons (Fig. 2).

Un minimum de complexité pour un maximum de résultats.

Ce genre de modèles donne toujours une représentation très simplifiée des phénomènes naturels. Tout l'art est donc de trouver un compromis acceptable entre simplicité (donc schématisation) et complexité (donc réalisme). Une certaine simplicité est nécessaire à l'applicabilité pratique du modèle qui sera d'autant plus grande que le nombre de données nécessaire sera restreint et que ces données seront déjà disponibles ou aisément déductibles d'informations existantes. D'autre part, plus le modèle sera simple, plus le temps de calcul sera court, ce qui joue un rôle important pour la quantification des incertitudes ou la réalisation des analyses de sensibilité qui servent à tester la robustesse des modèles en évaluant l'impact de légères variations des facteurs d'entrée sur les résultats.

La complexité et donc le réalisme d'un modèle ne peuvent être augmentés que si les relations de causalité et les grandeurs d'entrée peuvent être exprimées de façon quantitative. Toutefois, cet effort ne se justifie que si les prévisions gagnent en exactitude ou si le modèle en devient plus universel, c'est-à-dire applicable à une plus grande variété de sites ou situations. Nous pouvons par exemple créer un modèle décrivant de façon satisfaisante l'occurrence des macroinvertébrés dans la Mönchaltorfer Aa. Si ce modèle livre également des prédictions correctes pour la Gürbe et la Thur, il devient plus intéressant pour les utilisateurs potentiels et se trouve en même temps consolidé par la confirmation d'une représentation correcte des processus en cause. Dans ce cas-là, une utilisation du modèle dans un contexte de variation des conditions environnementales est éventuellement envisageable. Mais l'universalité absolue n'existe pas. Il serait illusoire d'espérer qu'un quelconque modèle puisse s'appliquer à tous les cours d'eau quelle que soit leur nature, qu'il s'agisse du Rhin à Bâle ou d'un torrent de haute montagne.

Des données accessibles sur Internet. Les données concernant les spécificités des différents groupes taxonomiques d'invertébrés sont tirées de banques de données en ligne alimentées par les travaux de nombreux chercheurs et chercheuses. Ainsi, les données concernant les habitats préférentiels et les modes de nutrition proviennent du site www.freeshwater ecology.info [4] tandis que celles portant sur la sensibilité aux pesticides sont issues d'une banque de données relative à l'indice SPEAR [5].

L'indice SPEAR se base sur le pourcentage d'espèces sensibles aux pesticides présentes dans les assemblages de macroinvertébrés, lui-même évalué à partir de données classiques de monitoring telles que celles recueillies par les services de

protection des eaux. Une forte représentation de ces taxons sur un site est ainsi un signe de non contamination par les pesticides tandis que la présence de nombreuses espèces tolérantes révèle l'existence d'une pollution. Nous utilisons ces informations dans notre modèle en augmentant le taux de mortalité des espèces sensibles sur les sites supposés contaminés, simplifiant en cela fortement l'impact des pesticides sur les communautés d'invertébrés. Nous procédons de manière similaire pour la matière organique qui, à forte concentration, peut provoquer des conditions d'anoxie dans les cours d'eau, en nous servant de l'indice de saprobie qui est utilisé depuis longtemps en Europe centrale pour évaluer la qualité de l'eau [6].

Jusqu'à présent, nous avons testé le modèle sur quatre stations du bassin versant de la Mönchaltorfer Aa, un affluent du lac de Greifen dans le canton de Zurich, pour lesquelles des séries de données nous ont été fournies par l'office zurichois des déchets, de l'eau, de l'énergie et de l'air (AWEL) [7]. Nous disposons ainsi d'informations sur l'occurrence et la fréquence des espèces de macroinvertébrés relevées selon la méthode du système modulaire gradué (niveau R) de même que de données sur les teneurs en nutriments et en pesticides et sur les conditions d'écoulement et de température. Nous avons ainsi été en mesure d'évaluer les conditions environnementales des quatre sites et de nous en servir de grandeurs d'entrée pour la modélisation (Tab.).

Validation sur le terrain : épreuve réussie. Beaucoup de grandeurs d'entrée du modèle comme le taux de croissance ou de mortalité des taxons, sont entachées d'incertitudes. Dans ces cas-là, nous ne travaillons pas avec des valeurs fixes mais avec des distributions de probabilités qui rendent compte de la valeur centrale et de ses incertitudes. Pour évaluer de manière quan-

Conditions environnementales dans quatre stations de la Mönchaltorfer Aa.

	Station 1 En amont de la STEP	Station 2 En aval de la STEP	Station 3 En amont de la STEP	Station 4 En aval de la STEP
Température moyenne de l'eau (°C)	10,3	12,4	9,6	11,4
Régime thermique	Modéré	Chaud	Modéré	Chaud
Apports moyens de débris végétaux (g/m ² /an)	170	260	500	420
Ombrage (%)	15	26	90	95
Régime d'écoulement	Fort courant	Fort courant	Fort courant	Courant modéré
Présence de pesti- cides	?	Oui	Non	Oui
Classe de qualité selon l'indice de saprobie	I: Zone oligo- saprobe	II: Zone β-méso- saprobe	I: Zone oligo- saprobe	II: Zone β-méso- saprobe
Concentration moyenne en phos- phates (mg/l)	0,01	0,03	0,05	0,04
Concentration moyenne en azote (mg/l)	3,3	8,0	2,1	7,6

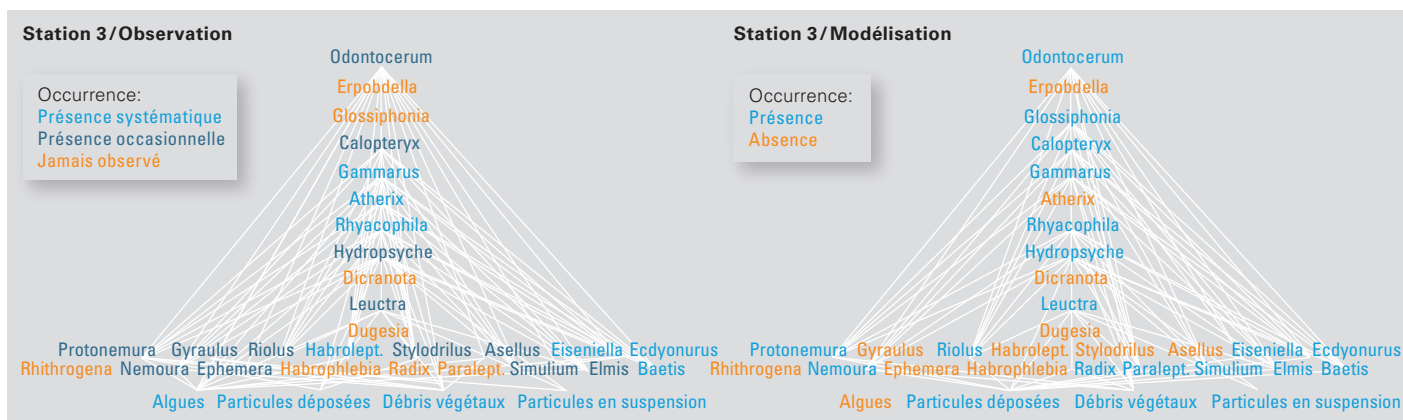


Fig. 3: Occurrence des macro-invertébrés dans deux stations de la Mönchaltorfer Aa représentée sous la forme d'un réseau trophique à l'échelle du genre. La colonne de droite indique les prédictions du modèle, celle de gauche les observations de terrain.

titative l'effet de ces incertitudes individuelles sur l'incertitude globale des prévisions du modèle, nous utilisons une méthode mathématique appelée simulation de Monte-Carlo qui nous livre une distribution de probabilités des résultats de la modélisation. Celle-ci nous permet alors de calculer pour chaque taxon la probabilité avec laquelle il peut, d'après le modèle, survivre à un endroit donné ou au contraire disparaître en raison, par exemple, de conditions environnementales défavorables.

Pour évaluer l'adéquation du modèle Streambugs avec la réalité, nous avons comparé les probabilités de présence calculées aux relevés de macroinvertébrés effectués dans les quatre stations de la Mönchaltorfer Aa (Fig. 3). L'épreuve du terrain s'est avérée probante dès les premiers tests, sans même qu'il ait été besoin d'ajuster les grandeurs d'entrée par un quelconque calibrage. Car si, comme nous nous y attendions, le modèle ne livrait pas de représentation détaillée pour tous les taxons, il indiquait de fortes probabilités de survie pour la plupart des taxons systématiquement observés sur un site donné et de faibles probabilités de subsistance pour ceux qui n'apparaissent jamais dans les relevés.

Une aide à la décision en matière de gestion des eaux. Notre étude montre que les modèles numériques peuvent aider à compenser certains manques de données en formulant des prévisions exploitables pour la prise de décision à partir de connaissances même fragmentaires. Pour qu'elles soient fiables et réalistes, un travail sur les incertitudes est toutefois indispensable. Ainsi, pour qu'un tel modèle trouve une réelle application pratique, il doit être élaboré en plusieurs étapes: évaluation du modèle théorique, application dans une grande variété de conditions environnementales et optimisation au regard de données de terrain et enfin, implémentation d'un logiciel adapté aux usagers.

Le modèle Streambugs 1.0 en est encore à sa première phase de développement. Les quelques cas dans lesquels les simulations n'ont pas correspondu aux observations de terrain sont particulièrement intéressants et seront analysés avec soin pour améliorer le modèle. Dans une prochaine étape, il sera sur d'autres sites pour vérifier la reproductibilité des résultats et cerner les causes de discordance. Ces études nous permettront par

ailleurs d'évaluer et, éventuellement, d'améliorer les potentialités d'utilisation et le pouvoir de prédiction du modèle.

Mais à terme, notre ambition est d'aboutir à un modèle capable de simuler la recolonisation d'un milieu après sa dégradation par un événement perturbateur, ce phénomène étant révélateur du succès ou de l'échec biologique d'une renaturation fluviale consécutive. Notre objectif est de créer un modèle qui, en plus de son intérêt scientifique, sera en mesure de prédire les effets des stratégies de gestion des eaux ou des changements climatiques sur l'occurrence des groupes faunistiques dans les rivières.



- [1] Schuwirth N., Kühni M., Schweizer S., Uehlinger U., Reichert P. (2008): A mechanistic model of benthos community dynamics in the River Sihl, Switzerland. *Freshwater Biology* 53, 1372–1392.
- [2] Schuwirth N., Reichert P. (2009): Modéliser les communautés biotiques des cours d'eau. *Eawag News* 66, 19–21.
- [3] Schuwirth N., Reichert P. (soumis): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems – Modeling invertebrate community composition in streams.
- [4] Schmidt-Kloiber A., Hering D. (2012): www.freshwaterecology.info – the taxa and autecology database for freshwater organisms, version 5.0 (accessed on 02/2011: version 4.0/2009).
- [5] Liess M., Schäfer R.B., Schriever C.A. (2008): The footprint of pesticide stress in communities – Species traits reveal community effects of toxicants. *Science of the Total Environment* 406, 484–490.
- [6] DIN 38410 (2004): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung (Gruppe M) Teil 1: Bestimmung des Saprobienindex in Fließgewässern (M 1).
- [7] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (2006): Wasserqualität der Seen, Fließgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich, Statusbericht 2006. Zürcher Umweltpaxis. www.gewaesserschutz.zh.ch

Gestion des eaux – l'art du compromis

Les écosystèmes aquatiques rendent un grand nombre de services socioéconomiques mais ne peuvent remplir leurs fonctions essentielles que si leurs exigences écologiques sont respectées. Nous devons donc mettre en place des stratégies durables de gestion des ressources qui tiennent aussi bien compte des besoins des populations humaines que de l'environnement. Projets sur le Spöl et dans la zone alluviale de Sandey montrent la voie.



Michael Döring, spécialiste d'écologie du paysage, étudie les rapports entre structure du milieu physique et fonctions des écosystèmes au sein du département d'Ecologie aquatique de l'Eawag. Coauteur : Christopher Robinson

Les besoins croissants des populations humaines et la progression inexorable des changements climatiques risquent de modifier les disponibilités en eau douce sur la planète. Déjà, dans les régions arides, certains grands fleuves n'atteignent plus les océans suite aux prélèvements excessifs des populations riveraines ou à la rétention de leurs eaux en amont (près de 4000 kilomètres cubes par an). Les fleuves et grandes rivières de la planète ont été largement dégradés pour la création de plus de 500 000 kilomètres de voies navigables. Les écoulements sont régulés par plus de 63 000 kilomètres de canaux et 50 000 barrages qui retiennent plus de 6300 kilomètres cubes d'eau, et d'autres grands projets de ce genre sont en préparation, notamment dans les pays en développement [1]. De leur côté, les changements climatiques se manifestent par une modification de la distribution et de l'intensité des précipitations entraînant une recrudescence des extrêmes climatiques comme les sécheresses ou les inondations.

L'eau, à la fois richesse et menace potentielle. Pour la Suisse, les données et prévisions actuellement disponibles indiquent ainsi que le gros des précipitations se concentrera sur la fin de l'hiver et le printemps, ce qui favorisera les inondations printanières et les étiages sévères de fin d'été. Et à long terme, la disparition progressive des glaciers ne fera qu'aggraver la situation. Tous ces changements auront des implications très concrètes en matière de lutte contre les inondations mais influenceront aussi sur toutes les activités dépendantes de l'eau comme l'agriculture, la production énergétique ou l'approvisionnement en eau potable.

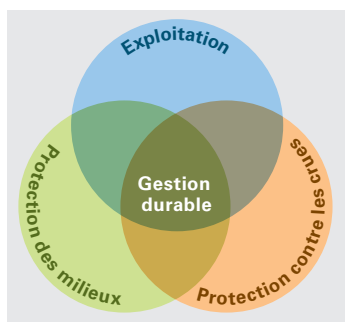


Fig. 1 : Une politique durable de gestion des eaux doit prendre en compte de façon équitable et holistique les différents intérêts écologiques, économiques et sociaux liés aux milieux aquatiques (d'après [3]).

Mais les dérèglements climatiques et les divers usages de l'eau auront également un impact sur les écosystèmes aquatiques qui devront faire face à des sollicitations et menaces supplémentaires. La Suisse a ainsi décidé d'abandonner le nucléaire et souhaite compenser une partie de l'énergie manquante par une extension de son parc hydroélectrique qui fournit déjà environ 55 pour cent de l'électricité produite dans le pays. En contrepartie, des mesures doivent être prises pour atténuer les impacts environnementaux de l'exploitation de la force hydraulique. La révision de la loi sur la protection des eaux entrée en vigueur en 2011 prévoit ainsi des assainissements destinés à réduire l'effet des éclusées, redynamiser le transport solide et rétablir la libre circulation des poissons dans les cours d'eau. Par ailleurs, un quart des tronçons perturbés, soit environ 15 000 kilomètres de linéaire, devraient être revitalisés dans les 80 ans qui viennent [2].

En nous fournissant des ressources exploitables, les eaux continentales nous rendent donc de nombreux services, notamment économiques. Mais en tant qu'habitats, ces milieux exigent une certaine qualité environnementale pour pouvoir remplir leurs fonctions écologiques et, a fortiori, être utiles à l'homme. D'un autre côté, les torrents et rivières peuvent constituer une menace physique pour les populations humaines et leurs infrastructures. Les milieux aquatiques sont donc au cœur d'une multitude d'enjeux et de conflits d'intérêts encore exacerbés par les changements climatiques. Dans un tel contexte, il devient de plus en plus urgent d'adopter des modes de gestion des eaux qui soient durables, c'est-à-dire qui prennent en compte aussi bien les besoins de la société que ceux des écosystèmes (Fig. 1). Nous devons donc, dans une approche holistique, considérer les impératifs écologiques, économiques et sociaux de façon équitable pour dégager des solutions consensuelles bénéficiant de l'aval de tous les acteurs concernés. Il nous faut pour cela dépasser les modes de pensée sectoriels, développer les approches participatives en matière de décision et planifier sur le long terme.

Gestion adaptative, la clé de la durabilité. Un outil méthodologique peut nous aider sur la voie de la durabilité : la gestion adaptative. Il s'agit d'un processus planifié et systématique qui permet d'améliorer continuellement les pratiques de gestion environne-

mentale en acquérant des connaissances sur leurs résultats. Par itération, il permet ainsi de s'approcher de solutions optimales.

Dans deux études de cas – l'une sur le Spöl dans le Parc national suisse et l'autre dans la zone alluviale de Sandey en bordure du ruisseau Urbach dans le canton de Berne –, nous avons cherché à savoir comment les intérêts écologiques et économiques pouvaient être conciliés dans une approche adaptative pour aboutir à une stratégie de gestion durable. Dans le premier cas, l'objectif est de renaturer un cours d'eau fortement dégradé par des aménagements hydrauliques en le soumettant régulièrement à des crues artificielles sans que les interventions nuisent à la production électrique. Dans le deuxième cas, nous avons étudié les effets d'aménagements passés sur un paysage alluvial et tenté de trouver des solutions de revitalisation compatibles avec les activités agricoles et la protection des biens et des personnes contre les inondations.

Le Spöl prend sa source au Lago di Livigno, un lac de retenue situé à la frontière italo-suisse. Alors que le cours d'eau présentait autrefois un débit oscillant entre 6 et 12 mètres cube par seconde (m^3/s) et pouvant ponctuellement culminer à $120 \text{ m}^3/\text{s}$, il ne dispose plus depuis sa régulation par le barrage que d'un débit résiduel constant de $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$ en été et $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ en hiver. Dans le cadre de notre étude, ce régime résiduel constant est interrompu une à trois fois par an depuis 2000 par des crues artificielles dans le but de se rapprocher des conditions d'écoulement d'origine (Fig. 2). La question était de savoir si cette stratégie pourrait encore avoir des répercussions positives sur l'état écologique du Spöl après 30 ans d'adaptation à un écoulement minimal et uniforme.

D'un point de vue écologique, un régime hydraulique optimal est atteint (débit de base, moment, durée, fréquence et intensité des crues) lorsqu'il permet aux espèces typiques de recoloniser le milieu et de s'y maintenir même dans un contexte de variation des conditions climatiques.

Retour vers un état plus naturel. Les crues artificielles ont eu très peu d'effet sur les propriétés physico-chimiques de la rivière puisqu'elles étaient alimentées, comme l'écoulement résiduel, par les couches profondes du lac de Livigno (hypolimnion). Elles ont en revanche eu un effet bénéfique sur la porosité du lit qui s'était fortement compacté sous l'effet des débits résiduels constants. L'entraînement des alluvions s'est amélioré et, au bout de deux ans, le tapis de mousse qui s'était développé sur le fond avait disparu. De même, la quantité de matière organique accumulée en surface du lit (zone benthique) a chuté cependant que les populations de producteurs primaires, comme le phytoplancton, régressaient. Malgré la richesse en matières nutritives du milieu, la croissance algale sur le fond reste limitée grâce à un arrachement récurrent par les crues.

Au niveau des macroinvertébrés benthiques, les crues artificielles ont fait baisser aussi bien la densité de population que la diversité spécifique et modifié la composition des communautés au profit des espèces les plus petites, ce qui s'est traduit par une baisse générale de la biomasse. Ainsi, les populations d'espèces sédentaires et de grandes taille et donc sensibles aux pertur-

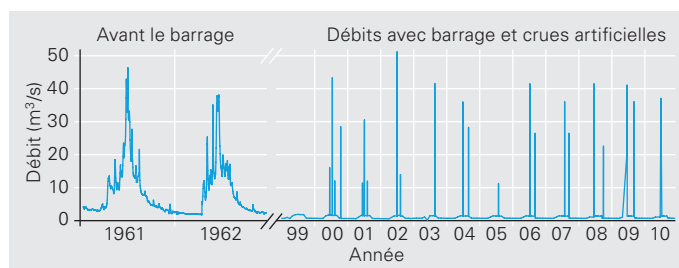


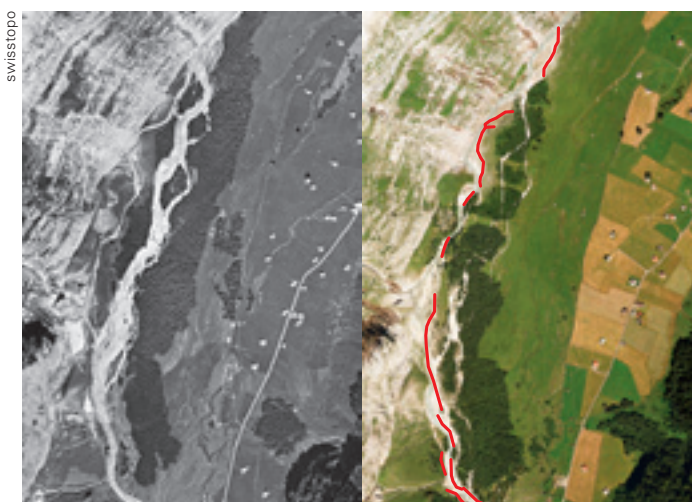
Fig. 2: Le Spöl présentait un régime hydrologique naturel jusqu'en 1970 (partie gauche du diagramme), date à laquelle un barrage hydroélectrique est venu le doter d'un débit résiduel constant d'environ $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Depuis l'an 2000, des crues artificielles de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ y sont provoquées régulièrement pour rendre un caractère plus naturel au régime de la rivière.

bations comme le gammare (*Gammarus fossarum*) ont chuté tandis que les espèces résistantes plus petites et plus mobiles comme les éphémères du genre *Baetis* étaient favorisées. Dans l'ensemble, les macroinvertébrés observés après le changement de régime présentaient une plus forte diversité morphologique et formaient des assemblages plus variés.

Les résultats obtenus jusqu'à présent indiquent donc que les crues artificielles ont permis au Spöl de retrouver des caractéristiques assez proches, en termes de milieu physique et de composition faunistique, de celles d'une rivière de montagne naturelle comparable. En même temps, l'exemple du Spöl montre aussi qu'il n'est pas impossible de concilier intérêts économiques et protection de la nature. En effet, les eaux soutirées au barrage pour alimenter les crues artificielles peuvent être ensuite déviées vers d'autres retenues pour produire de l'électricité sans augmentation significative des coûts [3–4].

Concilier activités humaines et protection de la nature. Lancé en collaboration avec les Forces motrices de l'Oberhasli

Fig. 3: L'observation de photographies aériennes prises en 1940 et en 2007 montre bien à quel point la zone alluviale s'est modifiée entre les deux dates. Les traits rouges indiquent la position des digues de protection contre les inondations.



et les Offices fédéraux de l'environnement et du développement territorial, le projet portant sur la zone alluviale de Sandey (Fig. 3) allie études de terrain, modélisation hydraulique, télédétection et analyse de données pour évaluer les effets des aménagements passés sur le paysage alluvial et estimer le bénéfice potentiel de mesures de revitalisation comme un arasement des digues. Les améliorations écologiques doivent cependant être compatibles avec les activités humaines exercées dans le bassin versant et la protection des biens et des personnes en cas de crue. L'étude doit ainsi permettre de progresser sur la voie du développement durable en livrant des bases scientifiques solides pour que puisse s'instaurer entre les différents acteurs aux intérêts parfois divergents un dialogue constructif et dépassionné aboutissant à la définition transparente d'une politique de gestion d'avenir. D'autre part, la participation d'une grande diversité d'acteurs à l'échelon régional, national et international et l'établissement de parallèles avec des études comparables doit faciliter la transposition des résultats à d'autres contextes.

La zone alluviale de Sandey s'étend sur 3,5 kilomètres et couvre 118 hectares et présente au premier abord une grande diversité structurelle offrant tous les types d'habitats caractéristiques : îlots, ripisylve, différents types de chenaux et bancs de graviers. Figurant à l'inventaire des zones alluviales d'importance nationale, elle bénéficie d'un statut de protection particulier. En marge, la plaine alluviale est utilisée pour le pâturage et diverses activités. En amont, un barrage construit en 1950 détourne environ 30 pour cent du débit annuel de la rivière, l'Urbach, à des fins de production hydroélectrique. D'autre part, la zone alluviale active est interrompue par de nombreuses digues longitudinales construites pour la plupart dans les années 1990 pour protéger les terres avoisinantes des débordements du cours d'eau.

L'observation d'anciennes photographies aériennes révèle l'étendue des changements survenus dans la zone alluviale en quelques décennies. Il apparaît ainsi que la fréquence des diffé-

Fig. 4 : Evolution de la mosaïque d'habitats de la zone alluviale de Sandey de 1940 à 2007. Les chiffres ont été évalués à partir de photographies aériennes.

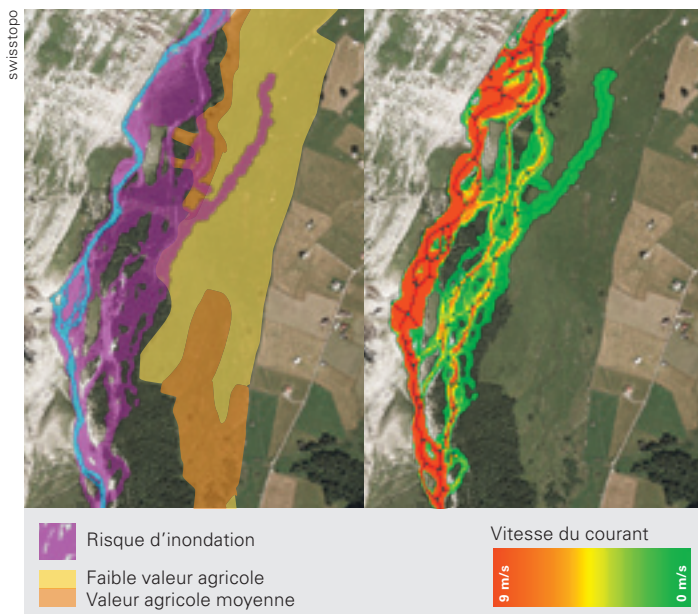
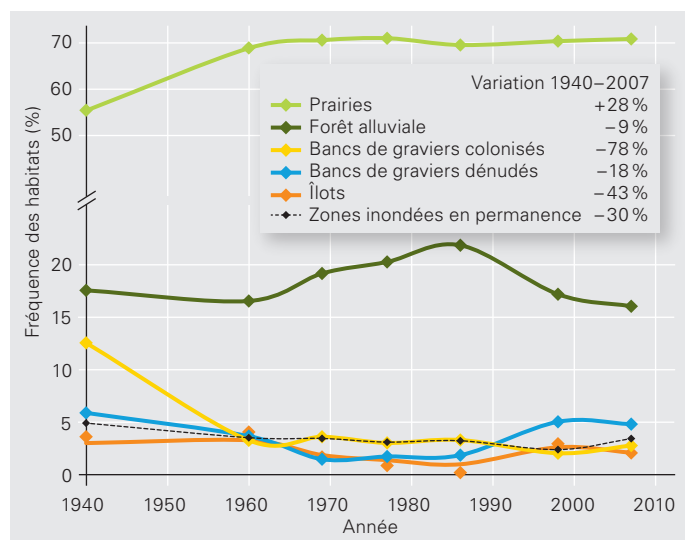


Fig. 5 : La modélisation permet de simuler les conséquences écologiques et économiques des options de gestion des écoulements dans la zone alluviale de Sandey. Dans le cas illustré ici, les effets d'un arasement des digues sur les possibilités d'utilisation des terres agricoles et sur les vitesses d'écoulement ont été simulés.

rents habitats alluviaux et la complexité du système de chenaux se sont modifiées de façon inhabituelle pour un écosystème naturel. Si l'on se réfère à l'état non perturbé de la zone en 1940, on observe une uniformisation du milieu et une raréfaction de certains habitats alluviaux typiques (Fig. 3 et 4) qui ont été très probablement causées par la dérivation d'une partie de l'écoulement en amont et surtout par la présence des digues longitudinales qui contrarient fortement la dynamique naturelle du milieu alluvial [5].

Réponses des processus écologiques. Dans chaque type d'habitat, nous avons mesuré le taux moyen de respiration en tant que descripteur des processus de transformation du carbone au sein de l'écosystème et avons déterminé l'intensité de cette activité dans les conditions actuelles. A partir des taux de respiration spécifiques des différents habitats et de la surface respective qu'ils occupaient à différentes époques, nous avons ensuite pu calculer l'évolution de la transformation du carbone dans la zone alluviale au cours du temps. Nos résultats révèlent une forte modification de cette activité au cours des 70 dernières années, ce qui trahit une forte réactivité structurelle et fonctionnelle des milieux alluviaux aux changements du régime hydrologique. En rétablissant une dynamique plus naturelle d'inondation de la plaine alluviale, il semble donc possible d'accroître l'hétérogénéité des habitats et donc de restaurer au moins partiellement la diversité fonctionnelle et biologique originelle de l'écosystème alluvial.

La dynamique fluviale d'origine pourrait être en partie rétablie par le biais, par exemple, d'un arasement des digues. Dans un milieu aussi fortement utilisé par l'homme que la plaine alluviale

de Sandey, la liberté retrouvée par la rivière pourrait toutefois être synonyme d'un risque accru d'inondation pour les populations et infrastructures limitrophes. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la modélisation des paysages, il est aujourd'hui possible de simuler différents scénarios de débordement en fonction des interventions sur l'hydrologie du cours d'eau et de déterminer les configurations qui entraîneraient le risque de dommages le plus faible. La même démarche peut ensuite s'appliquer aux habitats afin, par exemple, de localiser les zones de la plaine alluviale qui tireraient le meilleur bénéfice écologique pour un risque matériel minimal (Fig. 5). Les premiers résultats indiquent que la réouverture d'anciens chenaux latéraux provoquerait un gain significatif de biodiversité et l'apparition de nouveaux habitats tout en réduisant le risque d'inondation en périphérie de la zone alluviale.

La modélisation permet également d'estimer les effets futurs des changements climatiques ou de modification des activités économiques liées à l'eau. L'objectif d'une telle approche est de livrer aux décideurs et professionnels des bases de décision concrètes pour la planification et l'adoption de modes de gestion durables permettant une exploitation économique des milieux tout en garantissant la pérennité de leurs fonctions écologiques.

L'importance d'un suivi des projets à long terme. Gérer les ressources aquatiques de façon durable et intégrée n'est pas chose facile. Si l'enjeu est de garantir la pérennité des activités humaines sans exploiter les milieux au-delà de ce qu'ils peuvent supporter sans perdre leur intégrité écologique, une telle ambition suppose avant tout de disposer de connaissances solides des besoins des écosystèmes en question. Que leur faut-il, en effet, pour rester intacts et conserver à long terme leur viabilité écologique et donc, entre autre, rester en mesure de fournir les services dont les sociétés humaines ont un besoin si vital ?

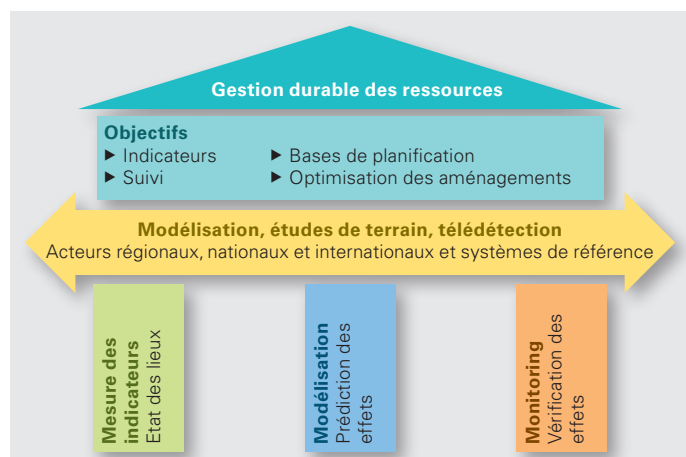
Les études du Spöl et de la Sandey montrent deux manières empiriques et pragmatiques de se rapprocher d'une gestion

durable des eaux qui, en s'appuyant sur la concertation, rend compte de la complexité des enjeux et des milieux naturels concernés (Fig. 6). Les résultats déjà obtenus sur le Spöl ont été si convaincants que les crues artificielles ont été intégrées au plan de gestion du barrage qui régule les débits de la rivière. D'autre part, le projet a fait des émules à l'étranger comme à la Snowy River en Australie ou au Colorado aux Etats-Unis. Mais cette étude a également montré qu'il était indispensable de prévoir un suivi des projets à long terme pour observer les changements au cours du temps et juger correctement de l'effet des interventions [6–7].

Le projet Sandey montre comment l'utilisation combinée de différentes méthodes d'analyse permet dans une approche holistique d'appréhender les changements survenus dans une entité paysagère comme une plaine alluviale et de cerner les enjeux économiques et écologiques la concernant. La télédétection permet d'autre part de mettre en place un suivi territorial de la zone et, combinée aux autres analyses, de vérifier et de garantir le succès à long terme des mesures engagées.

La gestion adaptative des bassins versants et la revitalisation des milieux fluviaux ne peuvent se concevoir sans une approche holistique et de long terme qui, seule, permet de tirer les enseignements des erreurs éventuelles et de trouver, dans un processus itératif, un compromis équilibré entre ambitions écologiques et activités économiques. La gestion des ressources aquatiques doit être considérée comme une obligation morale de nos sociétés envers leur propre avenir et celui des milieux naturels dont l'enjeu n'est autre que la préservation à long terme des fonctions écologiques et des services rendus par les écosystèmes. ○ ○ ○

Fig. 6: Stratégie envisageable pour la mise en place d'une politique de gestion intégrée et durable des ressources aquatiques: mesure d'indicateurs sur le terrain pour établir un état des lieux, modélisation numérique pour évaluer les effets des interventions possibles et monitoring pour observer les changements à long terme.



- [1] Tockner K., Stanford J.A. (2002) : Riverine flood plains : present state and future trends. *Environmental Conservation* 29 (3), 308–330.
- [2] Göggel W. (2012) : Revitalisation des cours d'eau. Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. *L'environnement pratique* N° 1208-F.
- [3] Office fédéral de l'environnement (2012) : Gestion par bassin versant – Guide pratique pour une gestion intégrée des eaux en Suisse. *Umweltwissen* 1204.
- [4] Robinson C.T. (2012) : Long-term changes in community assembly, resistance and resilience following experimental floods. *Ecological Applications*, online.
- [5] Robinson C.T., Uehlinger U. (2008) : Experimental floods cause ecosystem regime shift in a regulated river. *Ecological Applications* 18, 511–526.
- [6] Döring M., Blaurock M., Robinson C.T. (2012) : Landscape transformation of an alpine floodplain influenced by humans – Historical analysis of aerial images. *Hydrological Processes*, online.
- [7] Robinson C.T., Döring M., Seelen L. (2011) : Importance of protected areas for freshwater biomonitoring – Case studies in Switzerland. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 3, 13–23.
- [8] Robinson C.T., Örtli B. (2009) : Long-term biomonitoring of alpine waters in the Swiss National Park. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 1, 23–34.

Potentialités et limites de l'hydraulique



Alfred Wüest, physicien, dirige le département Eaux superficielles de l'Eawag et enseigne à l'EPF de Zurich et à celle de Lausanne.

Coauteurs : Andreas Bruder, Armin Peter, Stefan Vollenweider

La Suisse va très bientôt investir des sommes colossales dans l'hydraulique. Il faut trouver des solutions intelligentes, à la fois rentables et écologiquement acceptables, pour assurer la production de pointe et le stockage des suppléments produits par les nouvelles énergies renouvelables. Ce serait bénéfique aussi bien à la Suisse qu'Europe et, dans l'idéal, gagnant-gagnant pour les rivières et les électriciens.

Tout le monde en Suisse a accès à l'électricité. Ce qui nous paraît naturel ne l'est pas car la mise en place d'un système de production et de distribution durable et stable est une tâche difficile que tous les gouvernements ne parviennent pas à remplir avec la même efficacité. La catastrophe de Fukushima n'a pas arrangé les choses. En Suisse, le Parlement et le Conseil fédéral ont très rapidement décidé d'abandonner la filière électronucléaire. Nous devons maintenant de toute urgence trouver des solutions pour compenser les quelque 24 TWh/an qui viendront à manquer. Ce déficit énergétique, que nous allons devoir combler par une double stratégie de sobriété et efficacité énergétiques et de renforcement des autres filières, représente aujourd'hui 40 pour cent de la consommation du pays et devrait augmenter du fait de la progression incessante des besoins en électricité.

Nous avons donc besoin, pour être réalistes, de solutions énergétiques livrant 30 à 40 TWh/an [1]. Le plus simple serait de recourir aux énergies fossiles mais ce serait incompatible avec les engagements climatiques du protocole de Kyoto dont la Suisse est cosignataire. La solution doit donc venir des énergies renouvelables comme l'éolien, le solaire, l'hydraulique ou la géothermie. Mais quel rôle peut et doit jouer la filière hydroélectrique dans le scénario énergétique à venir ?

Le rôle tampon de l'hydraulique. Le secteur hydraulique est le principal producteur d'électricité de la Suisse dont il couvre plus de 55 pour cent des besoins – mais ses capacités d'expansion sont limitées. Même si les estimations de l'Office fédéral de

l'énergie [2], de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux [3] et des organisations écologistes diffèrent, on peut considérer de façon réaliste que sa capacité de production pourrait être augmentée de 1 à 3 TWh/an nets (Tab. 1). En tenant compte de la baisse de production entraînée par le respect des dispositions relatives aux débits résiduels, l'optimisation des ouvrages existants et la construction de nouvelles centrales ne permettraient d'augmenter les capacités que de 10 pour cent par rapport au niveau actuel [3]. En termes de production, l'hydraulique ne sera donc pas en mesure de combler le déficit qui nous attend. Etant donné, par ailleurs, que l'éolien a peu d'avenir en Suisse et que celui de la géothermie est incertain, il apparaît nettement que la filière photovoltaïque devra jouer un rôle important dans le futur mix énergétique.

Mais l'hydraulique peut contribuer de deux autres façons à la résolution des problèmes d'approvisionnement de la Suisse et du reste de l'Europe : (1) en assurant une production de pointe en période de forte consommation et (2) en assurant un stockage des excédents en période de faible demande. Avec une puissance installée maximale de 13,4 GW et des pointes effectives d'environ 10 GW, le parc hydroélectrique suisse est particulièrement flexible et peut réagir très rapidement aux variations de la demande. Disposant en outre d'une capacité de stockage d'environ 4 km³ dans ses barrages-réservoirs alpins, il est en mesure de compenser les irrégularités d'alimentation du réseau pendant plusieurs mois. Etant donné que jusqu'à présent, les périodes de surproduction soudaines et imprévisibles du solaire et de l'éolien – on parle de production stochastique – ne jouaient pas de rôle réel en Europe, les Alpes disposent encore de peu d'installations de pompage-turbinage dédiées à la compensation des fluctuations jour/nuit. Cette situation va très certainement changer dans un proche avenir : La Suisse peut devenir une pièce maîtresse dans l'échiquier énergétique européen en stockant une grande partie de l'énergie de pointe produite de façon stochastique.

L'hydraulique pour compenser les fluctuations journalières. Si d'avenir, la part de l'éolien (du nord de l'Europe) et du photovoltaïque (suisse) augmente, la production d'électricité sera beaucoup moins régulière et connaîtra d'énormes fluctuations

Tab. 1 : Potentialités d'accroissement de la production hydroélectrique en Suisse [2–4].

Interventions	Potentiel estimé (TWh/an)
Efficacité énergétique, optimisations, rénovations	1,0 à 1,8
Grandes centrales hydrauliques	0,7 à 1,4
Petite centrales hydrauliques	0,7 à 1,7
Respect des débits réservés	–2,0 à –1,4
Changements climatiques	± 0
Total	0,5 à 3,5

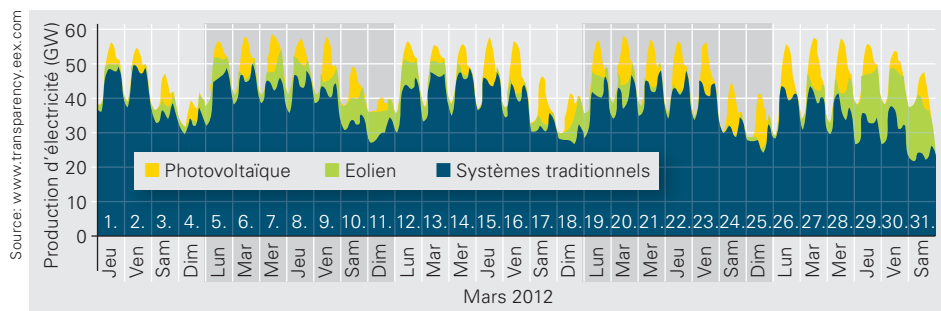
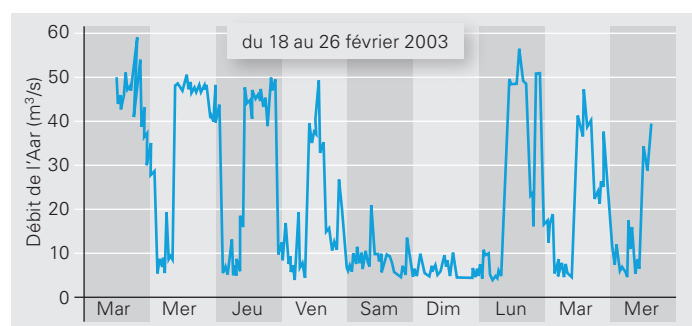


Fig. 1 : Production d'électricité de l'Allemagne pendant le mois de mars 2012. Le samedi 31, la production d'origine solaire et éolienne a atteint 32 GW en milieu de journée, soit plus de 50 pour cent du total. Dans de telles situations, des installations de pompage-turbinage devraient être disponibles pour stocker l'excédent de production.

journalières, voire horaires (Fig. 1). Quel sera l'ordre de grandeur des excédents et déficits de production des nouvelles énergies renouvelables ? Et avec quelle soudaineté vont-ils se manifester ? Pour nous faire une idée, considérons que les 30 TWh/an perdus par l'abandon du nucléaire seront produits par la filière photovoltaïque. D'après l'expérience de nos voisins allemands, une telle production nécessiterait une puissance installée de 40 GW [4]. Le réseau aurait alors à faire face à des variations de puissance pouvant atteindre 20 GW en fonction de l'ensoleillement. Le parc hydroélectrique suisse n'est pas aujourd'hui en mesure de compenser totalement de telles fluctuations. Même si le solaire a l'énorme avantage de produire pendant les périodes de consommation maximale et que l'installation de réseaux intelligents permet de compenser les variations de courte durée, il apparaît nettement que les capacités de stockage doivent être augmentées.

Une augmentation de la puissance installée des centrales à accumulation consécutive à un accroissement des capacités de stockage dans les barrages réservoirs accentuerait toutefois les problèmes liés aux éclusées en aval des restitutions. Les eaux stockées sont en effet turbinées en fonction de la demande d'électricité (maximale pendant la journée et les jours ouvrables) et le rythme, la durée et le volume des restitutions créent dans les tronçons qui les accueillent un régime artificiel caractérisé par une succession de crues ou éclusées et d'étiages qui perturbe gravement les écosystèmes aquatiques touchés (Fig. 2). La montée rapide des eaux peut ainsi déstabiliser le fond du cours d'eau et provoquer l'entraînement de nombreux organismes comme les larves d'insectes et les poissons de petite taille qui disparaissent

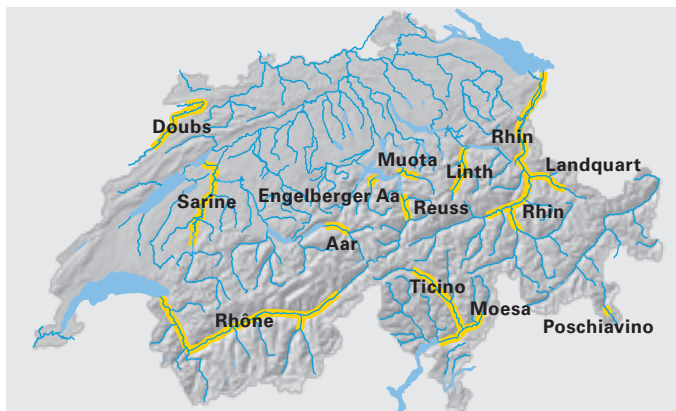
Fig. 2 : Débits de l'Hasli-Aare présentant un régime d'éclusées typique avec un rapport de 10:1 entre le débit d'écluse et le débit plancher. Les conditions sont en général meilleures en été suite à un débit naturellement plus élevé.



peu à peu. En défavorisant ces organismes fragiles de façon récurrente, les éclusées peuvent donc modifier la composition faunistique des écosystèmes affectés (Tab. 2). Lorsque le niveau de l'eau redescend après la période de turbinage, de nombreux organismes et en particulier des poissons peuvent s'échouer ou

Tab. 2 : Effets des éclusées hydroélectriques.

	Phénomène	Impact direct
Montée subite des eaux (éclusee)	Augmentation subite de la vitesse du courant	► Dérive des organismes d'eau courante (dépassant les apports venant de l'aval) ► Fuite vers les zones de moindre courant ► Entraînement de la matière organique (ressource nutritive)
	Mobilisation des matériaux de fond	► Dégradation mécanique ► Dérive d'organismes benthiques ► Entraînement des sédiments fins ► Augmentation de la turbidité
	Apport et transport de matières en suspension	► Augmentation de la turbidité ► Augmentation du stress physiologique ► Blessures (peau et branchies) ► Abrasion des organismes ► Réduction de la photosynthèse
Phase de haut débit	Déplacement de la charge de fond	► Endommagement mécanique des organismes benthiques ► Réduction du colmatage du fond
	Modifications de la température de l'eau	► Dérive d'organismes d'eau courante ► Augmentation d'activité
	Modification de la composition géochimique de l'eau	► Exposition des organismes à des concentrations variables d'oxygène, de nutriments et de matière organique et inorganique
Baisse subite des eaux (stockage)	Réduction de la surface mouillée	► Echouage des organismes (mise à sec, gel des habitats et des frayères) ► Blocage des organismes dans des habitats inadaptés
	Baisse subite de la vitesse du courant	► Sédimentation des particules en suspension ► Colmatage du fond
Phase de faible débit	Faible surface mouillée, faible hauteur d'eau	► Problèmes classiques des tronçons court-circuités : Modifications de la qualité de l'eau (manque d'habitats et de continuité écologique, problèmes thermiques)
Variabilité des débits élevée	Régime d'écoulement artificiel	► Altérations morphologiques ► Perturbations du comportement des poissons et du macrozoobenthos



Source : Association suisse pour l'aménagement des eaux

Fig. 3: Carte des principaux secteurs de cours d'eau fortement influencés par les éclusées. Leur fréquence est particulièrement élevée en amont immédiat des lacs périalpins. Le Rhône en amont du Léman, le Rhin alpin en amont du lac de Constance, le Ticino, la Sarine et le Doubs sont particulièrement touchés.

être piégés dans des mares provisoires. La succession rapide et incessante de ces phases de turbinage et de stockage a de multiples effets sur l'écologie des cours d'eau et en particulier sur leur biocénose [5], les poissons et les invertébrés étant tout particulièrement affectés par les variations subites de débit. Les centrales à pompage-turbinage, au contraire, ne posent pas ce genre de problèmes puisque les échanges entre le bassin supérieur et le bassin inférieur se font indépendamment des cours d'eau.

Atténuation des effets écologiques des éclusées. Les cours d'eau influencés par les éclusées se rencontrent dans tout l'arc alpin mais c'est en Suisse, en amont des lacs périalpins, que leur fréquence est particulièrement frappante (Fig. 3). Dans la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux de 2010, le Parlement a décidé, les effets néfastes des éclusées hydroélectriques devaient dorénavant être éliminés ou atténués. Les nouveaux objectifs doivent être atteints par le biais d'aménagements hydrauliques éventuellement accompagnés de modifications volontaires

Fig. 4: Modèle d'un petit bassin de compensation [8]. L'image est traversée au premier plan par l'Aar qui s'écoule de haut en bas et de droite à gauche et reçoit la Gadmerwasser à droite du bassin. Un bassin d'environ 50000 m³ permettrait de ramener le rapport débit d'éclusée/ débit plancher de 8:1 à 5:1.



de la gestion des ouvrages. Les autorités cantonales travaillent actuellement à la planification stratégique des assainissements qui doivent être coordonnés avec les autres actions prévues dans le bassin versant (revitalisations) et ordonneront ensuite la réalisation des aménagements.

Les bassins de compensation font partie des aménagements envisageables pour réduire les effets des éclusées hydroélectriques (Fig. 4). Les petits bassins de compensation peuvent ralentir les variations de débit mais ne modifient pas le débit maximal tandis que des bassins de compensation de grand volume peuvent absorber les fluctuations journalières voire hebdomadaires et réduire ainsi les minima et les maxima. Une étude a été réalisée sur mandat de l'Association pour l'aménagement des eaux pour estimer les volumes qui seraient nécessaires [6]: Pour ramener le rapport entre le débit d'éclusée et le débit plancher à 5:1, des bassins de quelques centaines de milliers à plusieurs millions de mètres cubes devraient être créés pour le Rhin, le Rhône, la Reuss, l'Aar, le Ticino et l'Inn. La surface occupée serait plus ou moins importante selon la périodicité des fluctuations à compenser et pourrait atteindre plusieurs dizaines d'hectares.

Les bassins de compensation pourraient également servir de petits bassins inférieurs pour des centrales à pompage-turbinage et pourraient ainsi contribuer à la gestion de la production stochastique venant des nouvelles énergies renouvelables. La construction de bassins de compensation suffisamment grands permettrait de stocker les excédents de l'éolien et du photovoltaïque pendant plusieurs heures dans des lacs de retenue plus en amont. En raison des espaces qu'il faudrait leur sacrifier, de tels projets risquent fort de rencontrer une vive opposition. Ce serait cependant un mal nécessaire si la capacité de turbinage des installations restituant en cours d'eau devait être augmentée.

Le pompage-turbinage pour compenser les fluctuations de grande périodicité. En plus de la construction de bassins de compensation équipés de systèmes de pompage, celle de nouvelles centrales à pompage-turbinage doit être envisagée pour compenser les fluctuations de production des nouvelles énergies renouvelables. La Suisse dispose aujourd'hui de 14 centrales de ce type, généralement petites, totalisant une puissance installée de pompage de 1,4 GW (Tab. 3). Par rapport aux fluctuations stochastiques qui, selon nos estimations, attendent le réseau européen, cette capacité est insignifiante. C'est pourquoi de nombreux projets sont actuellement à l'étude en Suisse. Trois grands chantiers ont déjà été lancés.

Le pompage-turbinage sur des lacs de haute montagne représente-t-il la solution la plus éco compatible? Les transferts entre barrages existants ou l'utilisation d'un très grand lac périalpin comme bassin inférieur auraient un impact assez faible sur les milieux naturels à condition que les installations de pompage soient conçues de manière à ne pas happer les poissons. Nous pouvons sur ce point tirer les enseignements des effets désastreux de certaines centrales comme celle de Geesthacht sur l'Elbe. Un des dangers des transferts entre lacs peut encore être la mise en contact écologique et hydrologique de bassins versants différents. Pour des raisons écologiques (marnage, effets thermiques

Existantes		Total 1460
Grimsel 2	352	12 autres 852
Hongrin-Léman	256	
En construction		Total 2140
Hongrin-Léman/Veytaux II, 2015	240	Nant de Drance/Emosson, 2017 900
Linth-Limmern/Muttsee, 2015	1000	
Procédure d'autorisation en cours		Total 1630
Lagobianco (Val Poschiavo)	1000	Grimsel 3 (KWO Plus) 630

Tab. 3: Centrales à pompage-turbinage existantes ou en projet en Suisse. Puissance en MW.

et modifications de la turbidité), les petits lacs ne devraient pas être utilisés pour le pompage-turbinage. Les dimensions du lac de Poschiavo dans le Puschlav sont considérées comme le minimum acceptable [7]. Le grand avantage écologique du pompage-turbinage est de pouvoir accroître la production de pointe sans aggraver les problèmes liés aux éclusées.

D'après le tableau 3, la Suisse pourrait disposer d'une puissance de pompage d'environ 6 GW au moment de l'arrêt de la filière électronucléaire, ce qui devrait être suffisant pour absorber les fluctuations journalières et hebdomadaires des productions stochastiques et offrirait des réserves intéressantes aux producteurs européens. Cette capacité est toutefois encore trop faible pour assurer la stabilité du réseau pendant des périodes prolongées de grand froid, de canicule ou de sécheresse ou encore pour absorber les fluctuations saisonnières. En livrant une telle prestation, la filière hydraulique pourrait pourtant s'assurer de gains considérables qu'elle pourrait en partie réinvestir dans les compensations écologiques nécessaires.

L'hydraulique pour compenser les fluctuations saisonnières?

Si on considère que le déficit de production électrique occasionné en Suisse par l'abandon du nucléaire sera principalement compensé par une production photovoltaïque, la question se pose de savoir si le parc hydroélectrique (actuel) sera également en mesure de compenser les fluctuations saisonnières. L'expérience de nos voisins allemands montre que 50 pour cent de la production photovoltaïque annuelle s'effectue au printemps et à l'automne, 40 pour cent en été et 10 pour cent en hiver. Ramenés à l'échelle de la Suisse, ces chiffres indiquent que cette filière produirait un excédent estival de 4 à 5 TWh qui manquerait ensuite en hiver. Il paraît utopique de stocker une telle quantité d'énergie avec les volumes existants étant donné qu'ils sont déjà utilisés pour compenser les fluctuations saisonnières actuelles. Les estimations indiquent qu'un volume supplémentaire d'environ un kilomètre cube serait nécessaire pour stocker les excédents saisonniers, ce qui correspond *grosso modo* à la capacité totale du canton du Valais avec ses immenses barrages de la Grande Dixence, de Mauvoisin et d'Emosson. Même si une partie du volume peut être gagnée en surélevant les murs existants, il est évident que les projets de construction de nouveaux barrages d'un tel ordre de grandeur se heurtent à une forte opposition.

Questions de gestion durable. Ces perspectives de développement de l'hydraulique suscitent des interrogations très concrètes sur les conditions dans lesquelles la production de pointe et le stockage doivent s'effectuer pour être écologiquement acceptables: Quelles modifications des débits et de la contrainte exercée sur le fond des rivières doit-on atteindre dans le cadre de l'assainissement des secteurs influencés par les éclusées? Comment les bassins de régulation et de compensation doivent-ils être conçus pour que le pompage-turbinage et la compensation des fluctuations hebdomadaires soient efficaces? Quelles sont les exigences à respecter dans les lacs inférieurs en matière de température, de turbidité, de marnage et d'habitats piscicoles? Un calendrier doit être très prochainement mis en place pour étudier ces questions fondamentales (voir page 26).

Conclusion. En assurant une fonction de production de pointe et de pompage-turbinage, l'hydraulique suisse peut apporter une contribution décisive et constructive à l'intégration du courant produit de façon stochastique dans le réseau européen. La transition énergétique et l'adaptation du parc hydroélectrique qui pourrait être bénéfique sur bien des plans, demanderont à la Suisse des investissements très importants: (1) pour le développement de l'énergie solaire et (2) des capacités du réseau, (3) pour la construction de nouvelles centrales de pompage-turbinage et (4) la construction ou l'agrandissement des réservoirs alpins et enfin (5) pour l'aménagement de bassins de compensation. Alors que les aménagements nécessaires à la compensation des fluctuations journalières et hebdomadaires de l'offre et de la demande de courant semblent raisonnables et réalisables, la gestion des fluctuations saisonnières exigerait la construction de nouveaux grands barrages-réservoirs en haute montagne. Si un tel projet s'avérait inacceptable pour la population, il faudrait recourir pour l'hiver aux énergies fossiles ou à une extension de l'éolien à l'étranger. ○ ○ ○

- [1] ETH Zürich (2011): Energiezukunft Schweiz, Studie vom November 2011.
- [2] Bundesamt für Energie (2011): Energieperspektiven 2050. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen.
- [3] Pfammatter R. (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz – eine Auslegeordnung. Wasser Energie Luft 104 (1).
- [4] European Energy Exchange AG, Leipzig, www.transparency.eex.com
- [5] Baumann P., Klaus I. (2003): Conséquences écologiques des éclusées – Etude bibliographique. Informations concernant la pêche 75, Office fédéral de l'environnement.
- [6] Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (2006): Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk. Eine Standortbestimmung. Studie von VAW/ETHZ und LCH/EPFL.
- [7] Bonalumi M., Anselmetti F.S., Wüest A., Schmid M. (2012): Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. Water Resources Research. accepté.
- [8] Kraftwerke Oberhasli (2011): Aufwertung der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1: Das Wasser effizienter nutzen. Informationsbroschüre, KWO, Innertkirchen.

Nous devons travailler la main dans la main

En Suisse, chercheurs et professionnels ont des défis importants à relever dans le domaine des eaux. Ils ne seront toutefois en mesure d'accomplir les tâches qui les attendent que s'ils travaillent la main dans la main, telle est la conviction de Bernhard Wehrli de l'état-major de l'Eawag. En lançant le programme de recherche appliquée « Cours d'eau suisses », l'Eawag souhaite créer un réseau efficace entre spécialistes et professionnels de tous horizons.

Interview : Andres Jordi

L'un des trois axes de recherche de l'Eawag porte sur la viabilité et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Est-ce que ces écosystèmes «fonctionnent» en Suisse? En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux, la Suisse a de très bons résultats. Et avec le plan récemment proposé par le Conseil fédéral pour réduire les rejets de micropolluants, elle fait même figure de pionnière. Du côté du milieu physique, le constat est malheureusement tout autre. Les milieux aquatiques ont fortement souffert des endiguements et des aménagements hydroélectriques. Les seuils et barrages empêchent les poissons de remonter les rivières et de gagner les sites propices à leur reproduction. Les dispositions légales concernant les débits résiduels ne sont toujours pas appliquées partout. La loi fédérale exige depuis déjà 1992 que les cantons maintiennent des débits suffisants dans les tronçons court-circuités pour éviter que l'exploitation hydroélectrique des cours d'eau ait des conséquences écologiques trop importantes. Notamment les grands cantons alpins sont très en retard, ils ne parviendront probablement pas à respecter le délai qui leur a été accordé jusqu'à fin 2012.

Est-ce que cette constatation ne limite pas les espoirs placés dans la récente révision de la loi sur la protection des eaux?

Le problème des débits résiduels, c'est que les cantons doivent réaliser les assainissements sans contrepartie financière alors qu'ils auront à subir un manque à gagner sur leur production hydroélectrique. La révision prévoit au contraire un budget considérable pour la revitalisation des eaux et l'atténuation des effets d'exclusion. Les cantons vont pouvoir renflouer leurs caisses grâce aux péréquations financières et à la taxe sur le transport de l'électricité. Je pense que, dans ces conditions, l'application de la loi devrait poser moins de problèmes.

Est-ce que la volonté de développer l'hydraulique suite à l'abandon du nucléaire ne vient pas compromettre l'application de la nouvelle loi? Il est vrai que c'est une nouvelle donne. L'Office fédéral de l'énergie veut augmenter de 10 pour cent la production électrique d'origine hydraulique. En plus d'optimiser

les installations existantes, il est prévu de construire de grandes et petites centrales devant assurer à part égale le supplément de production. La réalisation de certains grands aménagements paraît judicieuse. En revanche, les petites centrales hydrauliques, qui devraient être construites en très grand nombre pour assurer la production demandée, sont incompatibles avec les objectifs de rétablissement de la connectivité et de la continuité écologique des cours d'eau et auraient un impact dramatique sur les habitats aquatiques. La Suisse exploite déjà 90 pour cent de son potentiel de production hydroélectrique et elle doit conserver un certain nombre de milieux intacts pour préserver la biodiversité et les fonctions essentielles des écosystèmes. Le conflit d'intérêt est bien réel.

Comment le résoudre? L'Agenda 21 pour l'eau nous offre une plateforme de discussion idéale

puisqu'il réunit tous les acteurs du secteur de l'eau, aussi bien l'Eawag que les hydroélectriciens, l'administration que les associations écologistes. Je pense par ailleurs que nous avancerions si les cantons procédaient à une classification de leurs cours d'eau en désignant les secteurs qui permettent une exploitation supplémentaire, ceux qui doivent impérativement être protégés et ceux qui sont sujets à discussion. Cela nous permettrait d'éviter les conflits inutiles et de nous concentrer sur les cas intéressants.

Quels sont encore les besoins en matière de recherche? Nous manquons encore cruellement de données sur la biodiversité aquatique. La biodiversité figure toujours en bonne place dans les objectifs de protection des eaux mais la mission n'est pas clairement définie: Quelle diversité doit-on protéger et où? Par quels moyens? Quelles sont les espèces favorisées par la renaturation des milieux? Est-ce qu'il s'agit au moins des espèces rares ou menacées? Nous avons d'autre part besoin d'un monitoring de la biodiversité qui englobe les aspects génétiques. La recherche peut développer des méthodes en ce sens. Etant donné que la gestion des eaux est de la compétence des cantons, les données de surveillance sont mal accessibles et ne sont pas toujours disponibles pour tout le territoire. Il faudrait les mettre à la disposition aussi bien du public que des scientifiques.

Les liens entre hydrologie et biologie doivent également être renforcés. Nous en savons encore trop peu sur le fonctionnement des habitats et sur les rapports entre hydromorphologie et vie aquatique. Nous devons connaître les mécanismes fondamentaux pour pouvoir décider des assainissements ou revitalisations à mettre en œuvre pour obtenir le meilleur résultat écologique possible.

Comment combler ces lacunes? Pour répondre aux questions suscitées par la révision de la loi sur la protection des eaux et l'abandon du nucléaire, l'Eawag est en train de mettre en place un programme de recherche, le programme « Cours d'eau suisses ». Son objectif est notamment de combler nos lacunes en matière de revitalisation et de migration piscicole et de favoriser une exploitation hydroélectrique plus respectueuse de l'environnement. On sait par exemple comment une passe à poisson doit être construite pour permettre le franchissement d'un obstacle vers l'amont mais la migration vers l'aval reste un problème. Nous misons sur une forte collaboration avec les professionnels sur le terrain pour garantir l'applicabilité pratique des résultats.

Quels sont vos partenaires dans ce programme de recherche?

Notre principal partenaire est l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) qui nous soutient dans nos objectifs. Pour le transfert des connaissances, nous aurons l'aide de l'association des professionnels de la protection des eaux (VSA). Les pêcheurs et pêcheuses auront aussi un important rôle à jouer, en tant que scientifiques amateurs en quelque sorte. Ils ont en effet une bonne connaissance des cours d'eau et grâce à leur présence régulière sur le terrain, ils peuvent livrer aux chercheurs des informations qui leur permettent d'ajuster leurs objectifs en temps réel. Nous comptons aussi sur une participation des acteurs de l'Agenda 21 pour l'eau.

Côté recherche, l'Eawag poursuivra sa collaboration de longue date avec le Laboratoire d'hydraulique de l'EPF de Zurich, le Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPF de Lausanne et l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). La Commission d'hydrologie de l'Académie suisse des sciences naturelles viendra compléter le tableau.

Quel est votre calendrier? Pour le moment, nous cherchons une personne pour diriger le programme de recherche. Cette personne devra disposer d'un bon bagage scientifique et d'une solide expérience pratique. Elle se chargera de l'organisation et de la coordination des travaux et devra veiller à leur application pratique. Le programme sera lancé fin 2012 pour au moins trois ans. Une durée de six à huit ans sera probablement nécessaire pour mettre en place un réseau solide de chercheurs et de professionnels.

Comment le programme sera-t-il financé? Nous avons plusieurs sources de financement. Le poste du responsable sera cofinancé par l'Eawag et l'OFEV. Ensuite, l'office se chargera principalement du financement des projets de recherche appliquée;

Peter Penicka



pour la recherche fondamentale, le Fonds national est toujours une bonne adresse. Mais certains projets peuvent également être financés par la Commission pour la technologie et l'innovation de la Confédération en partenariat avec l'industrie. Enfin, l'Eawag dispose d'un programme interne de financement qui peut intervenir ponctuellement pour telle ou telle étude.

Comment comptez-vous assurer la mise en pratique des résultats?

Mon expérience m'a appris que dans les projets de recherche appliquée, il était vraiment important de travailler directement avec les professionnels. C'est le meilleur moyen de comprendre leurs besoins et de connaître les problèmes auxquels ils sont confrontés. De leur côté, les professionnels ont ainsi un accès plus direct aux résultats de la recherche. Le programme « Cours d'eau suisses » proposera régulièrement des séminaires de formation continue qui garantiront les échanges de savoir et d'expérience. Nous voulons absolument savoir ce que les acteurs sur le terrain pensent de nos travaux et misons sur la communication: si les professionnels ont un problème ou un besoin particulier, nous voulons en être informés. Le programme « Cours d'eau suisses » est donc une main tendue aux professionnels et industriels. Nous avons très peu de temps pour relever les défis qui nous sont posés. Nous n'y parviendrons que si nous unissons nos forces. ○○○