Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

96-1 | 2008

Les barrages : vers de nouveaux enjeux pour la montagne

Les effets écologiques d'un programme de restauration hydrologique d'une rivière artificialisée

Sabine Mannes, Christopher-Thomas Robinson, Urs Uehlinger, Thomas Scheurer, Johannes Ortlepp, Uta Mürle et Peter Molinari

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/437>

DOI : 10.4000/rga.437

ISSN : 1760-7426

Cet article est une traduction de :

Ecological effects of a long-term flood program in a flow-regulated river - URL : <https://journals.openedition.org/rga/450> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Édition imprimée

Date de publication : 15 mars 2008

Pagination : 113-124

ISBN : 978-2-200-92500-0

ISSN : 0035-1121

Référence électronique

Sabine Mannes, Christopher-Thomas Robinson, Urs Uehlinger, Thomas Scheurer, Johannes Ortlepp, Uta Mürle et Peter Molinari, « Les effets écologiques d'un programme de restauration hydrologique d'une rivière artificialisée », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 96-1 | 2008, mis en ligne le 03 mars 2009, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/437> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.437>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.

Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Les effets écologiques d'un programme de restauration hydrologique d'une rivière artificialisée

Sabine Mannes, Christopher-Thomas Robinson, Urs Uehlinger, Thomas Scheurer, Johannes Ortlepp, Uta Mürle et Peter Molinari

NOTE DE L'ÉDITEUR

Traduction : Sophie Bonin

Introduction

- 1 Les crues sont aujourd'hui reconnues comme un des moteurs les plus importants de la structure et du fonctionnement des écosystèmes fluviaux (Poff et al. 1997, Hart et Finelli 1999, Malard et al. 2006). Le régime hydrologique naturel de la plupart des rivières est caractérisé par des crues régulières, qui peuvent fortement influencer la distribution et l'abondance des organismes aquatiques (Poff et al., 2002). Par exemple, les algues ont développé des caractéristiques structurelles liées aux crues (Biggs et al. 1998), les macroinvertébrés benthiques ont adapté leurs cycles de vie aux inondations saisonnières prévisibles (Robinson et Minshall 1998), et les poissons ont évolué vers des morphologies variées en réponse aux particularités hydrologiques des rivières (Poff et Allan 1995).
- 2 Le régime hydrologique naturel de la majorité des rivières du monde a été altéré par la régulation. Plus de 45 000 grands barrages (plus de 15 m de haut) à travers le monde ont fragmenté les rivières et influencé leur régime hydrologique (Oud et Muir, 1997 ; Jackson et al., 2001). Le but des barrages est en général le stockage de l'eau pour la

production électrique. Il est bien connu que ces ouvrages affectent l'ensemble des caractéristiques physiques et biologiques en aval, de différentes façons (Ward et Stanford, 1979, 1995 ; Wallace, 1990 ; Vinson, 2001 ; Graf, 2006). Ces rivières régulées ont un régime hydrologique modifié, mais aussi un régime thermique et une morphologie du lit perturbés. Dans la plupart des cas, les températures deviennent de plus en plus constantes (Vinson, 2001), les débits sont réduits, et le régime hydrologique devient bien différent des conditions naturelles (Poff et al., 1997 ; Vinson, 2001). Ces modifications des conditions abiotiques conduisent au changement des communautés aquatiques (au sens de Southwood, 1988), favorisant les associations adaptées à des environnements plus stables (Armitage, 1976 ; Poff et Allan, 1995).

- 3 Ces dernières années, l'idée a émergé qu'il serait important de restaurer le régime hydrologique naturel des rivières pour leur intégrité écologique (Sparks, 1995 ; Petts, 1996 ; Poff et al., 1997 ; Galant et al., 1998 ; Sparks et al., 1998 ; Dudgeon, 2000 ; Pringle et al., 2000 ; Robinson et al., 2003). La prise en compte de critères comme la température et le régime hydrologique est relativement récente dans la gestion des cours d'eau. Jusqu'à présent, celle-ci se fondait sur des critères de seuils, proposant des concentrations maximales de polluants des eaux pour rester en dessous de certains niveaux de risques (Poole et al., 2004). La mise en œuvre d'une gestion des cours d'eau fondée sur le régime hydrologique est souvent difficile en raison des multiples groupes d'intérêt impliqués dans les décisions de gestion (Andrews et Pizzi, 2000 ; Patten et al., 2001).
- 4 La rivière Spöl offre un bon exemple de gestion réussie fondée sur le régime hydrologique, qui a profité largement aux acteurs. La Spöl coule dans une vallée confinée du Parc National Suisse et est utilisée pour la production hydroélectrique depuis 1970. Le captage de l'eau et l'absence d'inondations ont abouti à des changements dans les habitats riverains et les biocénoses. Le débit réservé était trop faible pour mobiliser et transporter les sédiments grossiers, et le lit de la rivière a été colmaté par les sédiments fins, ce qui a nui à la reproduction naturelle de la population de truites (Ortlepp et Mürle, 2003). Cela a également entraîné la formation en amont de cônes de déjection issus de l'érosion des versants latéraux (Mürle et al., 2003). La stabilisation du débit a aussi entraîné la densification des tapis d'algues, l'extension des couvertures de mousse, et une communauté invertébrée atypique pour une rivière des montagnes alpines (Robinson et al., 2003 ; Uehlinger et al., 2003).
- 5 En 1996, les autorités du Parc, la société Engadin Hydroelectric Power, et les gouvernements cantonal et fédéral, se sont mis d'accord pour mettre en œuvre un programme hydrologique pour améliorer l'intégrité écologique de la Spöl : quinze crues expérimentales ont pour cela été lâchées entre 2000 et 2006. La question principale de cet article est de déterminer si ce programme a amélioré l'intégrité écologique de la rivière au débit régulé. Des paramètres abiotiques et biotiques ont été utilisés comme indicateurs des modifications de l'intégrité de la rivière. Nous attendions des impacts faibles des crues artificielles sur les qualités physiques et chimiques, car les eaux relâchées venaient du fond du réservoir. Nous faisons l'hypothèse que les crues programmées allaient réduire la biomasse de périphyton, et la richesse en invertébrés, la biomasse et la densité, et entraîner une modification vers des associations de macroinvertébrés plus résistantes aux perturbations. Nous prédisions que les conditions d'habitat des poissons seraient améliorées et conduiraient à un meilleur recrutement. Enfin, nous nous attendions à ce que les premières crues aient un plus

grand impact que les suivantes de même importance du fait du changement dans la structure des associations.

Méthode

Situation et programme hydrologique

- 6 L'étude a porté sur la rivière Spöl, dans les Alpes centrales (Fig. 1). Le climat de cette région est caractérisé par des précipitations relativement faibles, et de fortes amplitudes thermiques saisonnières et journalières (Barry, 1992). Depuis le réservoir de Livigno en Italie, les débits de la Spöl traversent une vallée confinée et rejoignent l'Inn à Zernez (Suisse). La végétation dans la vallée est dominée par le sapin (*Picea abies*) et le pin (*Pinus mugo*), alors que l'aulne (*Alnus incana*) est commun sur les berges. Le site étudié, Punt Periv (E10°11'22", N46°36'38"), est à environ 2,3 km en aval du barrage-réservoir (Punt dal Gall). L'altitude est de 1 660 m/mer alors que l'altitude maximale de la rivière dans le haut bassin est de 3 302 m/mer. La rivière à Punt Periv a une largeur de 10 à 18 m, et une pente de 1 à 2 %. Le lit du cours d'eau est constitué de galets alluviaux, de rochers, et par endroit de fonds rocheux.

Figure 1. Carte de l'aire d'étude dans la Parc National Suisse, montrant le barrage à Punt dal Gall et le site de Punt Periv.

- 7 Avant que la rivière ne soit utilisée pour la production hydroélectrique, le débit moyen annuel était de 6,6 à 12,5 m³/s, avec des crues atteignant régulièrement 20 à 60 m³/s en été et au début de l'automne. Après la mise en eau du barrage, en 1970, le module a été réduit de 8,6 m³/s à 1 m³/s, du fait du captage des eaux pour la production hydroélectrique. Le programme de crues expérimentales a commencé l'été 2000, avec trois lâchers d'eau de 12 à 42 m³/s. Une à trois crues ont été lâchées les années

suivantes, soit un total de quinze crues entre 2000 et 2006. Le régime des crues a été changé au fil du temps, pour en réduire la fréquence (une à deux par an) mais en augmenter l'intensité (30 à 50 m³/s), afin de créer les modifications écologiques souhaitables pour les habitats. Il s'est avéré que les plus petites crues avaient moins d'impacts les dernières années de l'étude, car la majorité des sédiments fins avaient été chassés du système (Scheurer et Molinari, 2003). Une année sèche en 2005 a limité la disponibilité de l'eau pour les lâchers, ce qui a fait qu'une seule petite crue (12 m³/s) a pu être programmée cette année-là. Tous ces lâchers ont été neutres du point de vue financier et de la production électrique, parce qu'un système de baisse du débit réservé est venu compenser l'eau lâchée pour les crues expérimentales.

Figure 2. Le régime hydrologique de la Spöl avant la construction du barrage (1961 et 1962), après sa construction (1999), et durant le programme hydrologique (2000-2006). Le débit en 1999 représente le débit réservé maintenu en aval du barrage, toute l'eau supplémentaire étant détournée pour la production électrique.

Protocole de terrain et analyse des données

- 8 L'échantillonnage sur le terrain a commencé en 1999, un an avant la mise en place des crues programmées. Des mesures sur 200 m de long ont eu lieu 1 à 3 jours avant une crue, et 1 à 2 jours après, et à intervalles réguliers entre chaque crue. Les Études Suisses hydrologiques et géologiques ont fourni les données sur les écoulements. La température dans la rivière a été mesurée par des stations de relevé de températures (Vemco Inc., Nova Scotia, Canada) qui ont été posées en 1999, et les résultats téléchargés tous les 4 à 6 mois. La turbidité, exprimée en UTN, Unité de Turbidité Néphélométrique (Cosmos, Züllig AG, Suisse) et la conductivité, en µS/cm à 20 °C (WTW LF340, Weilheim, Allemagne), ont aussi été mesurées sur le terrain. En plus, les concentrations en nutriments (azote et phosphore) ont été mesurées selon la méthode de Tockner et al. (1997).
- 9 Les macroinvertébrés benthiques ont été inventoriés à chaque visite avec un échantillonneur Hess (0,045 m², 250 µm de maille), et conservés dans une solution à 70 % d'éthanol. Les organismes ont été prélevés manuellement dans chaque échantillon, en utilisant un microscope à dissection au grossissement X 10, identifiés au niveau taxonomique pratique le plus bas (généralement le genre) et comptés. Après élimination des macro-invertébrés benthiques, les échantillons ont été séchés à 60 °C,

pesés, brûlés à 550 °C et pesés à nouveau pour les estimations de la matière organique benthique (BOM), en AFDM¹.

- 10 Pour les mesures du périphyton, dix pierres, de la taille de galet, ont été collectées aléatoirement, placées dans un sac de conservation en plastique, ramenés au laboratoire, et laissés congeler à - 25 °C jusqu'à leur examen. Avant l'analyse, les mousses ont été enlevées et mesurées en AFDM. Le périphyton a été retiré de chaque galet en frottant avec une brosse métallique et en rinçant. Des extraits de cette suspension ont été passés par deux filtres Whatman GF/F. L'un des filtres a servi à l'analyse de la chlorophylle a, et l'autre au périphyton AFDM. Les dimensions de chaque galet ont été prises (a-, b-, c-axe) pour déterminer la surface de chacun, et la biomasse de périphyton a été exprimée en gramme par m², suivant Robinson et al. (2000).
- 11 Les conditions de vie de la truite dans la Spöl ont été évaluées en cartographiant la structure de l'habitat sur la zone d'étude, et en déterminant la composition sédimentaire de la couche supérieure du lit (8 à 12 cm de profondeur). L'information sur l'état de la population de truites a été recueillie par comptage et cartographie annuels des zones de frai entre Punt dal Gall et Punt Periv, et par pêche électrique de 200 m de portée, à environ 600 m en aval du réservoir de Livigno. Le stock total de poissons a été évalué selon la méthode de DeLury (1947). L'état des poissons capturés (rapport taille-poids) a été calculé.
- 12 L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour tester les effets des crues séquentielles sur les macroinvertébrés et le périphyton. Les observations ont été groupées en pré-crue (PRE), années 2000-2003 (MID), et post-2003 (POST) pour l'analyse. Elles ont été transformées par log(x+1) pour satisfaire les exigences de normalité (Zar, 1984). Pour mesurer le niveau de signification, on a enfin réalisé un test post-hoc HSD de Tukey.

Résultats

Caractéristiques physico-chimiques

- 13 La température moyenne de l'eau (7-8 °C) n'a pas beaucoup changé, en lien avec des crues issues à chaque fois d'eaux profondes. Les valeurs de conductance spécifique et de turbidité entre les crues n'ont pas été modifiées par rapport à la période précédant les crues expérimentales. Le phosphore particulaire et les composés azotés ont diminué après les crues, alors que les autres composés du phosphore sont restés constants.

Les effets des crues sur le périphyton

- 14 La biomasse de périphyton a été considérablement réduite par les crues (AFDM : $F = 24.48$, $p = 0.0001$; chlorophyll-a : $F = 40.98$, $p = 0.0001$) (Fig. 3). Toutefois, des valeurs élevées ont été mesurées entre chaque inondation dues à une récupération rapide par le périphyton. Les valeurs les plus élevées ont été atteintes entre les inondations de 2001 et en 2003 (90 g/m² AFDM, 400-500 mg/m² chlorophyll-a). Après 2004, la biomasse de périphyton a diminué jusqu'à des valeurs plus faibles qu'avant les crues (2004 : moyenne = 20 g/m² AFDM, 27 mg/m² chlorophyll-a).

Figure 3. Moyennes (± 1 SD) pour la chlorophylle-a du périphyton, et son AFDM pour les échantillons recueillis avant les crues (PRE), les échantillons prélevés après la première crue en 2000 jusqu'à avant celle de 2003 (MID), et les échantillons prélevés après la crue de 2003 (POST).

Les lettres indiquent les différences significatives selon le test de Tukey à $p < 0,05$.

Les effets des crues sur les macroinvertébrés

- 15 La richesse en macroinvertébrés ($F = 41.79$, $p = 0.0001$), la densité ($F = 7.77$, $p = 0.001$) et la biomasse ($F = 26.09$, $p = 0.001$) ont été considérablement réduites par les crues programmées (Fig. 4). La richesse taxonomique a diminué de 7 taxons durant ce programme hydrologique, à comparer à la richesse moyenne de 12 qui avait été évaluée en 1999. La densité moyenne a été réduite d'un facteur d'environ 2,6 de 22 700 en 1999 à 8 800 ind/m² après 2003. Entre chaque crue, la densité en macroinvertébrés retrouvait les valeurs antérieures aux crues programmées. Les crues ont aussi réduit la biomasse moyenne de 13,7 g/m² en 1999 à 3,2 après 2003.

Figure 4. Moyennes (± 1 SD) pour les macroinvertébrés : A) Richesse taxonomique, B) Densité, C) Biomasse, pour les échantillons prélevés avant les crues (PRE), les échantillons prélevés après la première crue en 2000 jusqu'à avant celle de 2003 (MID), et les échantillons prélevés après la crue de 2003 (POST).

Les lettres indiquent les différences significatives selon le test de Tukey à $p < 0,05$.

- 16 Les taxons de macroinvertébrés de la Spöl ont réagi différemment aux crues (Fig. 5). Les densités du gammaridé *Gammarus fossarum* ($F = 5.85$, $p = 0.005$) et du turbellarié *Crenobia alpina* ($F = 13.22$, $p = 0.0001$) ont diminué tout au long du programme. Les crues ont réduit la densité moyenne de *G. fossarum* de 7 000 ind/m² en 1999 à 2 540 ind/m² après 2003. La densité moyenne de *C. alpina* était de 2 180 ind/m² avant les crues et de 132 ind/m² après 2003. Les chironomidés ont aussi diminué ($F = 5.29$, $p = 0.007$) de 8 340 ind/m² en 1999 à 2 360 ind/m² en 2003. *Baetis* spp. et *Protonemura* sp. eux ont été favorisés par les crues. La densité de *Protonemura* a augmenté plus de cinq fois, jusqu'à 1 360 ind/m², pour une mesure en 1999 de 240 ind/m² ($F = 4.61$, $p = 0.013$). *Baetis* spp. récupère rapidement après les crues et a atteint entre les crues des densités supérieures à 6 000 ind/m², alors que la densité avant les crues était seulement de 1 160 ind/m² ($F = 0.55$, $p = 0.579$). Pour *Simulium* sp., on a trouvé une augmentation de la densité les trois premières années du programme ($>8\,000$ ind/m²). Après 2003, cette densité a diminué jusqu'au niveau d'avant les crues (<100 ind/m²) ($F = 12.03$, $p = 0.0001$). La densité de Trichoptera était globalement faible dans l'étude initiale de la Spöl, et l'est restée tout au long de l'étude. Certaines années cependant, on a trouvé des populations denses des trichoptères *Rhyacophila* spp., *Allogamus uncatatus* et *Drusus* sp.

Figure 5. Moyennes (± 1 SD) pour la densité de A) *Crenobia alpina*, B) *Gammarus fossarum*, C) *Baetis* spp., D) *Protonemura* sp., E) *Simulium* sp., F) Chironomidae, pour les échantillons prélevés avant les crues (PRE), les échantillons prélevés après la première crue en 2000 jusqu'à avant celle de 2003 (MID), et les échantillons prélevés après la crue de 2003 (POST).

Les lettres indiquent les différences significatives selon le test de Tukey à $p < 0,05$.

Les effets des crues sur la truite

- 17 Les crues ont augmenté la variabilité des profondeurs d'eau entre les réservoirs de Livigno et d'Ova Spin, et ont réduit le degré de colmatage observé avant 2000 (Mürle et al. 2003). L'abondance en poisson et leur état sont restés relativement constants les trois premières années du programme. Moins de 2 % du stock de poissons (> 5 cm) sont morts pendant les crues car ils ont échoué. Le nombre de frayères a considérablement augmenté le long des 2,6 km d'observation en-dessous du réservoir de Livigno. Un total de 58 frayères avaient été comptées en 1999, un quadruplement a été noté en 2004 (Fig. 6). Après 2004, le nombre de frayères a diminué légèrement, pour atteindre 214 en 2006. Les observations après les crues ont montré qu'il n'y avait pas seulement une augmentation des frayères mais aussi du nombre d'alevins.

Figure 6. Nombre de frayères comptées chaque année en novembre entre 1999 et 2006, dans la Spöl, entre Punt dal Gall et Punt Periv (distance = 2,6 km).

Discussion

- 18 Comme prévu, les crues ont eu peu d'impacts sur les paramètres physiques et chimiques mesurés. Les eaux profondes du réservoir ont été utilisées pour les crues, comme il en est pour le débit réservé normal. Ainsi, la température de l'eau et les concentrations en nutriments sont restées à peu près constantes durant les crues. La baisse du phosphore particulaire après les crues pourrait avoir été provoquée par la dispersion des sédiments fins.
- 19 Les crues ont réduit les stocks existants de périphyton comme prévu. Le périphyton récupérait entre les crues, mais était chassé par chaque nouvel évènement. Les petites crues (10-15 m³/s) ont eu un plus grand impact sur la biomasse de périphyton dans les premières années du programme qu'à la fin. Ainsi, les plus grandes crues (30-50 m³/s), utilisées dans les dernières années, ont eu le même effet que les plus petites crues du début du programme. Ces résultats suggèrent que l'utilisation à long terme de crues successives peut maintenir des niveaux bas de périphyton.
- 20 La richesse en macroinvertébrés, leur densité et leur biomasse ont été réduites par les inondations, conformément à notre hypothèse. La principale raison de la richesse taxonomique plus faible a été la perte des taxons les moins communs, une conclusion appuyée par Rader et al. (2007). Cette richesse pourrait augmenter dans l'avenir par la colonisation par de nouveaux taxons issus d'autres origines. La diminution de la densité et de la biomasse en macroinvertébrés est due à la perte d'organismes au poids important, tout particulièrement les gammaridés. Les dernières grandes crues (> 40 m³/s) ont entraîné un plus petit changement dans la biomasse et la densité que les premières crues de la même ampleur. Cela conduit à la conclusion que l'association

d'espèces touchées par les dernières crues devait être plus résistante aux perturbations que l'association présente dans les premières années du programme hydrologique.

- 21 Le changement dans la composition des macroinvertébrés est devenu manifeste en observant les modifications dans l'abondance des espèces individuelles. Les éphémères de la famille des Baetidae, et les plécoptères *Protonemura* sont bien adaptés aux perturbations et récupèrent rapidement après chaque crue. Les gammaridés et la planaire *Crenobia alpina*, plus habitués à des écoulements réguliers, ont effectivement vu leurs populations réduites par le programme. La densité de *Simulium* a augmenté les trois premières années, puis a diminué les années suivantes. Les *Simulium* n'étaient pas communs avant les crues. Il semble qu'ils aient profité des conditions changeantes de milieu les premières années, mais qu'ils ne puissent pas se maintenir en abondance sur le moyen terme.
- 22 La qualité de l'habitat des poissons, des frayères en particulier, a été sensiblement améliorée, comme le suggéraient nos hypothèses. Les crues ont permis d'éliminer efficacement les sédiments fins du système, l'accroissement de la porosité du lit a donc amélioré les conditions de frai pour la truite. Après 2003, les crues de magnitude supérieure ont été nécessaires pour mobiliser plus amplement le substrat de la Spöl. L'amélioration des frayères a été aussi manifeste du fait qu'elles ont plus que quadruplé par rapport au début du programme hydrologique. Cependant, l'état des truites est resté relativement le même au long du programme. Les gammaridés sont une ressource alimentaire importante pour les truites, et la question demeure quant à l'influence de la diminution de la densité des gammaridés sur l'état des truites.
- 23 L'importance du régime hydrologique naturel pour soutenir l'intégrité du cours d'eau a été reconnue (Stanford et al. 1996, Poff et al. 1997). Le programme hydrologique de la Spöl simule partiellement un régime naturel, et a donc le potentiel d'améliorer son intégrité écologique. Les résultats de cette étude suggèrent que l'intégrité écologique a en effet été améliorée au cours du programme : augmentation de l'hétérogénéité des habitats, diminution de la couverture de mousse, composition des macroinvertébrés déplacée vers des taxons résistants aux perturbations, et potentiel de frai pour les poissons supérieur à la situation initiale. Mais le régime hydrologique mis en place diffère toujours par différents aspects du régime naturel de la Spöl avant 1970. Le débit réservé entre les crues manque de variation par rapport au régime original. Par conséquent, la question reste ouverte quant à savoir si les associations biotiques (périphyton, macroinvertébrés, poissons) changeront plus tard vers ce qu'elles étaient avant régulation, ou si leur développement restera entravé par la régulation des débits.

Conclusion

- 24 Les propriétés écosystémiques de la Spöl ont été modifiées de façon importante par le programme hydrologique. Le périphyton, les macroinvertébrés et l'habitat des poissons, ont été significativement influencés par les crues expérimentales. Les effets sur la biocénose ont été dépendants de la magnitude et de l'historique des crues. Les résultats soulignent l'importance du régime hydrologique pour la flore et la faune riveraine. Par exemple, Milhous (1998) a proposé que différents débits puissent être nécessaires à l'élimination des sédiments fins et au maintien des frayères pour un cyprinidé de la Gunnison River, Colorado, USA. La régulation du débit par les barrages modifie la composition des espèces en aval. Des crues programmées plus régulières et

plus fréquentes (par exemple, annuelles) en aval des barrages sont nécessaires, au-delà des habituels lâchers liés aux vidanges apériodiques pratiquées dans certains cours d'eau (Whiting, 2002). Le projet sur la Spöl montre qu'une association biotique plus naturelle est atteinte en mettant en place des crues artificielles répétées. La dynamique naturelle de la rivière Spöl n'a été que partiellement rétablie, car les débits réservés entre chaque crue étaient encore régulés. Ce compromis entre économie et écologie est nécessaire pour parvenir à un accord entre toutes les parties prenantes. Néanmoins, les résultats sur la rivière Spöl montrent que l'introduction de critères de gestion de rivière fondés sur le régime hydrologique est possible et représente une étape importante dans la réalisation des objectifs de restauration.

Nous remercions R. Illi pour l'analyse de toute la chimie de l'eau et des échantillons de chlorophylle, et C. Jolidon pour son assistance sur le terrain et le traitement de tous les échantillons d'invertébrés. Nous remercions également les personnes qui nous ont aidés pour les différentes visites sur le terrain : S. Blaser, M.T. Monaghan, M. Hieber, C. Jacob, S. Aebischer, P. Burgherr, U. Mürle, J. Ortlepp, S. Matthaei, D. Tonolla, B. Imhof, R. Vukelic, D. van der Nat, M. Döring, K. Kopp, K. Klappert, et L.N.S. Shama. L'Office fédéral des eaux et de la géologie a gentiment fourni les données sur les débits de la Spöl. Un financement partiel a été assuré par le Parc national suisse. Nous remercions F. Filli du Parc national suisse pour l'appui logistique au cours de l'étude. Nous remercions deux rapporteurs anonymes qui ont fourni des commentaires constructifs sur cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREWS E.D., PIZZI L.A., 2000. – « Origin of the Colorado River experimental flood in Grand Canyon ». *Hydrological Sciences* 45, pp. 607-627.
- ARMITAGE P.D., 1976. – « A quantitative study of the invertebrate fauna of the River Tees below Cow Green Reservoir ». *Freshwater Biology* 6, pp. 229-240.
- BARRY R. C., 1992. – *Mountain weather and climate*. Routledge, London.
- BIGGS B.J., STEVENSON R.J., LOWE R.L., 1998. – « A habitat matrix conceptual model for stream periphyton ». *Archiv für Hydrobiologie* 143, pp. 21-56.
- DELURY D.B., 1947. – « On the estimation of biological populations ». *Biometrics* 3, pp. 145-167.
- DUDGEON D., 2000. – « Large-scale hydrological changes in tropical Asia: prospects for riverine biodiversity ». *BioScience* 50, pp. 793-806.
- GALANT D.L., FREDRICKSON L.H., HUMBURG D.D., BATAILLE K.J., BODIE J.R., DOHRENWEND J.D., GELWICKS G.T., HAVEL J.E., HELMERS D.L., HOOKER J.B., JONES J.R., KNOWLTON M.F., KUBISIAK J., MAZOUREK J., MC COLPIN A.C., RENKEN R.B., SEMLITSCH R.D., 1998. – « Flooding to restore connectivity of regulated, largerriver wetlands ». *BioScience* 48, pp. 721-734.
- GRAF W.L., 2006. – « Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers ». *Geomorphology* 79, pp. 336-360.

- HART D.D., FINELLI M., 1999. – « Physical-biological coupling in streams: the pervasive effects of flow on benthic organisms ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 30, pp. 363-395.
- JACKSON R.B., CARPENTER S.R., DAHM C.N., MC KNIGHT D.M., NAIMAN R.J., POSTEL S.L., RUNNING S.W., 2001. – « Water in a changing world ». *Ecological Applications* 11, pp. 1027-1045.
- MALARD F., UEHLINGER U., ZAH R., TOCKNER K., 2006. – « Flood-pulse and riverscape dynamics in a braided glacial river ». *Ecology* 87, pp. 704-716.
- MILHOUS R.T., 1998. – « Modelling of instream flow needs: the link between sediment and aquatic habitat ». *Regulated Rivers: Research and Management* 14, pp. 79-94.
- MÜRLE U., ORTLEPP J., ZAHNER M., 2003. – « The River Spöl, Swiss National Park: Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation ». *Aquatic Sciences* 65, pp. 191-198.
- ORTLEPP J., MÜRLE U., 2003. – « Effects of experimental flooding on brown trout (*Salmo trutta* fario L.): The River Spöl, Swiss National Park ». *Aquatic Sciences* 65, pp. 232-238.
- ODD E., MUIR T., 1997. – « Engineering and economic aspects of planning, design, construction and operation of large dam projects ». In: T. Dorsey (ed.) *Large dams: learning from the past, looking at the future*. The World Conservation Union, Gland, Switzerland and the World Bank, Washington DC, USA.
- PATTEN D.T., HARPMAN D.A., VOITA M.I., RANDLE T.J., 2001. – « A managed flood on the Colorado River: background, objectives, design, and implementation ». *Ecological Applications* 11, pp. 635-643.
- PETTS G.E., 1996. – « Water allocation to protect river ecosystems ». *Regulated rivers: Research and Management* 12, pp. 353-365.
- POFF N.L., ALLAN J.D., 1995. – « Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability ». *Ecology* 76, pp. 606-627.
- POFF N.L., ALLAN J.D., BAIN M.B., KARR J.R., PRESTEGAARD K.L., RICHTER B.D., SPARKS E.E., SCHOMBERG J.C., 1997. – « The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration ». *BioScience* 47, pp. 769-784.
- POFF N.L., HART D.D., 2002. – « How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal ». *BioScience* 52, pp. 659-668.
- POOLE G.C., DUNHAM J.B., KEENAN D.M., SAUTER S.T., MCCULLOUGH D.A., MEBANE C., LOCKWOOD J.C., ESSIG D.A., HICKS M.P., STURDEVANT D.J., MATERNA E.J., SPALDING S.A., RISLEY J., DEPPMAN M., 2004. – « The Case for Regime-Based Water Quality Standards ». *Bioscience* 54, pp. 155-161.
- PRINGLE C.M., FREEMAN M.C., FREEMAN B.J., 2000. – « Regional effects of hydrologic alterations on riverine macrobiota in the New World: tropical-temperate comparisons ». *BioScience* 50, pp. 807-823.
- RADER R.B., VOELZ N. J., WARD J. V., 2007. – « Post-flood recovery of a macroinvertebrate community in a regulated river: resilience of an anthropogenically altered ecosystem ». *Restoration Ecology* 15, pp. 1-10.
- ROBINSON C.T., MINSHALL G.W., 1998. – « Macroinvertebrate communities, secondary production, and life history patterns in two adjacent streams in Idaho, USA ». *Archiv für Hydrobiologie* 142, pp. 257-281.

- ROBINSON C.T., RUSHFORTH S.R., BURGHERR P., 2000. – « Seasonal effects of disturbance on a lake outlet algal assemblage ». *Archiv für Hydrobiologie* 148, pp. 283-300.
- ROBINSON C.T., UEHLINGER U., MONAGHAN M.T., 2003. – « Effects of a multi-year experimental flood regime on macroinvertebrates downstream of a reservoir ». *Aquatic Sciences* 65, pp. 210-222.
- SCHEURER T., MOLINARI P., 2003. – « Experimental floods in the River Spöl (Swiss National Park): Framework, objectives and design ». *Aquatic Sciences* 65, pp. 183-190.
- SOUTHWOOD T.R.E., 1988. – « Tactics, strategies, and templets ». *Oikos* 52, pp. 3-18.
- SPARKS R.E., 1995. – « Need for ecosystem management of large rivers and their floodplains ». *BioScience* 45, pp. 168-182.
- SPARKS R.E., Nelson J.C., Yin Y., 1998. – « Naturalization of the flood regime in regulated rivers ». *BioScience* 48, pp. 706-720.
- STANFORD J.A., WARD J.V., LISS W.J., FRISSELL C.A., WILLIAMS R.N., LICHATOWICH J.A., COUTANT C.C., 1996. – « A general protocol for restoration of regulated rivers ». *Regulated Rivers: Research and Management* 12, pp. 391-413.
- TOCKNER K., MALARD F., BURGHERR P., ROBINSON C.T., UEHLINGER U., ZAH R., WARD J.V., 1997. – « Characteristics of channel types in a glacial floodplain ecosystem (Val Roseg, Switzerland) ». *Archiv für Hydrobiologie* 140, pp. 433-463.
- UEHLINGER U., KAWECKA B., ROBINSON C.T., 2003. – « Effects of experimental floods on periphyton and stream metabolism below a high dam in the Swiss Alps (River Spöl) ». *Aquatic Sciences* 65, pp. 199-209.
- VINSON M.R., 2001. – « Long-term dynamics of an invertebrate assemblage downstream of a large dam ». *Ecological Applications* 11, pp. 711-730.
- WALLACE J.B., 1990. – « Recovery of lotic macroinvertebrate communities from disturbance ». *Environmental Management* 14, pp. 605-620.
- WARD J.V., STANFORD J.A., 1979. – *The Ecology of Regulated Streams*, Plenum Press, New York.
- WARD J.V., STANFORD J.A., 1995. – « The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers ». *Regulated Rivers: Research and Management* 10, pp. 159-168.
- WHITING P.J., 2002. – « Streamflow necessary for environmental maintenance ». *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 30, pp. 181-206.
- ZAR J.H., 1984. – *Biostatistical Analysis*, 2nd edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

NOTES

1. AFDM : ash-free dry mass, en français : « masse sèche sans cendre ».

RÉSUMÉS

Le régime hydrologique naturel de la grande majorité des rivières du globe a été modifié par une régulation artificielle, qui a profondément affecté la morphologie fluviale et la vie aquatique. L'intégration de critères hydrologiques comme le débit et la température dans les programmes de restauration constitue une étape importante pour la gestion de rivière. Cet article synthétise les observations, en terme de qualité physicochimique de l'eau et de biocénose aquatique, des effets d'une programmation de crues sur le long terme (15 crues artificielles en huit ans) sur la rivière Spöl, dans le Parc National Suisse. Du fait des lâchers d'eau hypolimnétiques (issues des eaux profondes), ces crues ont peu d'impact sur les paramètres physiques et chimiques. La biomasse du périphyton a été réduite par les premières crues, puis s'est maintenue à des niveaux faibles pendant toute la période étudiée. La richesse spécifique, la biomasse et la densité de macro-invertébrés ont aussi été significativement réduites, et l'association de macroinvertébrés a évolué vers des taxons plus résistants aux perturbations. La qualité des habitats piscicoles, en particulier pour les zones de frai, a été sensiblement améliorée par les inondations. Une analyse plus approfondie a montré que la réponse de la biocénose à des crues d'ampleur similaire a changé pendant la période d'étude en parallèle avec la modification de la composition des associations biotiques.

The natural flow regime of many rivers on the globe has been altered by regulation, strongly influencing river morphology and aquatic biota. The incorporation of regimebased criteria such as flow and temperature regimes in restoration plans is an important step in river management. This paper summarizes the effects of a long-term flood program (15 floods over 8 years) on the river Spöl, Swiss National Park, on water physico-chemistry and river biota (periphyton, macroinvertebrates and fish). Due to hypolimnetic release, the floods had little impact on physical and chemical parameters. Periphyton biomass was reduced by the early floods and remained at low levels throughout the study period. Macroinvertebrate taxon richness, biomass and density were also significantly reduced and the macroinvertebrate assemblage shifted towards more disturbance-resistant taxa. The quality of fish habitat, especially for spawning, was noticeably improved by the floods. Further analysis suggested that the response of biota to floods of similar magnitude have changed over the study period in concert with the compositional shift in biotic assemblages.

INDEX

Mots-clés : crues artificielles, macroinvertébrés, périphyton, régime hydrologique résiduel, truite fario

Keywords : artificial floods, brown trout, macroinvertebrates, periphyton, residual flow regime

Index géographique : Spöl, Suisse

AUTEURS

SABINE MANNES

Department of Aquatic Ecology, EAWAG, Duebendorf, Switzerland and Institute of Integrative Biology, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.

CHRISTOPHER-THOMAS ROBINSON

Department of Aquatic Ecology, EAWAG, Duebendorf, Switzerland and Institute of Integrative Biology, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
robinson@eawag.ch

URS UEHLINGER

Department of Aquatic Ecology, EAWAG, Duebendorf, Switzerland and Institute of Integrative Biology, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.

THOMAS SCHEURER

Swiss Academy of Sciences, Schwarztorstrasse 9, CH-3007 Bern, Switzerland.

JOHANNES ORTLEPP

HYDRA Bureau for Freshwater Ecology, Mühleweg 17, D-75223 Öschelbronn, Germany.

UTA MÜRLE

HYDRA Bureau for Freshwater Ecology, Mühleweg 17, D-75223 Öschelbronn, Germany.

PETER MOLINARI

Engadin Hydroelectric Power Company, CH-7530 Zernez, Switzerland.