

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	98 (2006)
Heft:	1
Artikel:	Le projet Synergie : importance de la recherche pour la 3e correction du Rhône, nouveaux développements dans la gestion des crues
Autor:	Raboud, Pierre-Benoît / Schleiss, Anton / Heller, Philippe
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-939318

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

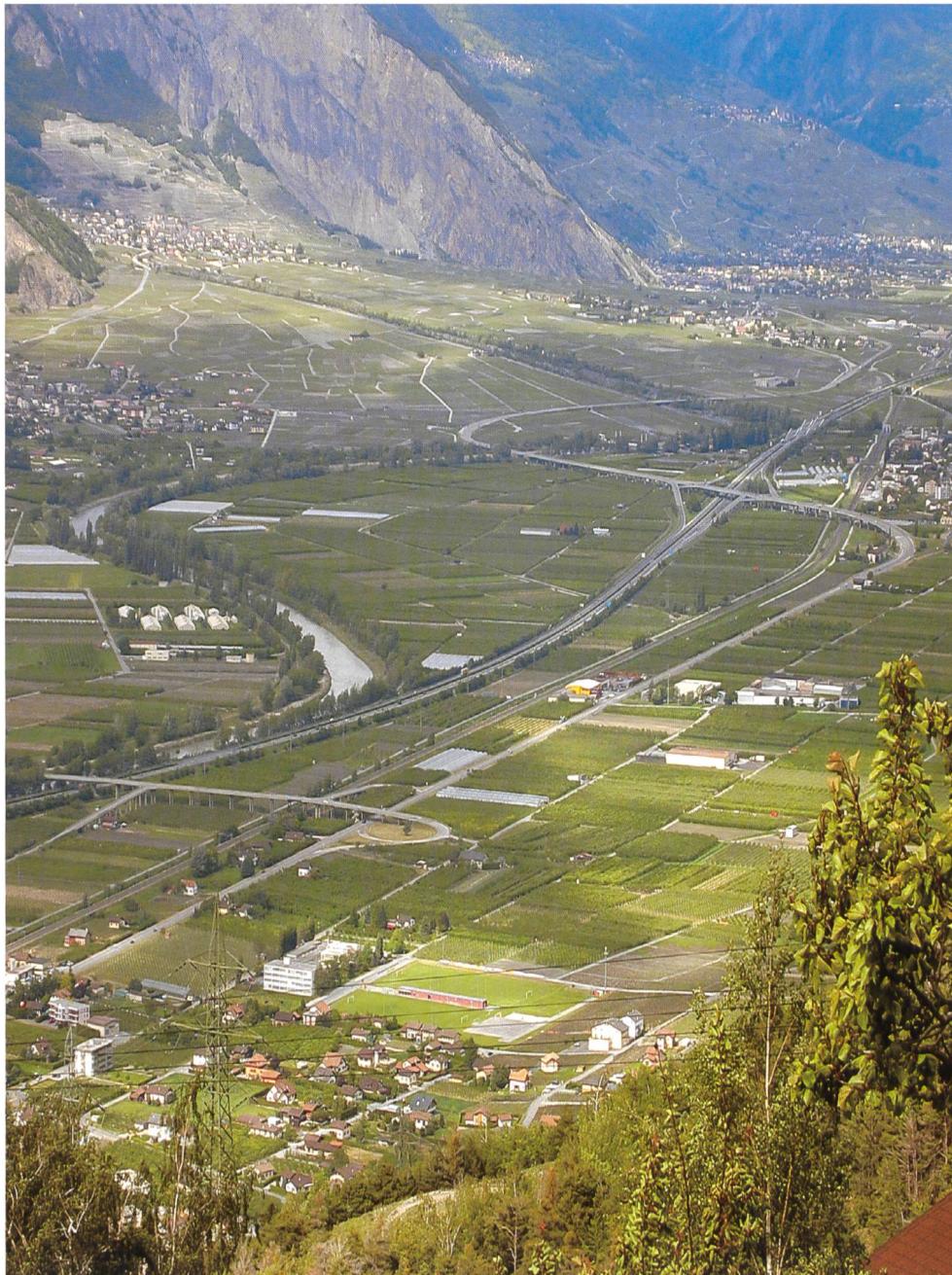
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Importance de la recherche pour la 3^e correction du Rhône, nouveaux développements dans la gestion des crues

Le projet Synergie



**Conférences du symposium sur la recherche appliquée en relation
avec la 3^e correction du Rhône – Martigny, le 9 juin 2005**

Le projet Synergie

Introduction

- Pierre-Benoît Raboud

Le titre de cette session pourrait faire l'objet d'un livre. Elle a pour objectif modeste, mais néanmoins intéressant, d'en faire découvrir quelques chapitres à l'aide de 4 présentations.

Cette session vise en définitive à faire connaître, au travers de quelques exemples concrets, une philosophie simple, celle de l'approche multidisciplinaire et transversale, celle qui facilite la solution de problèmes complexes. Cette philosophie s'appuie cependant sur des bases conceptuelles scientifiques de modélisation complexe qui nécessite une approche systémique.

La modélisation par la dynamique des systèmes se divise en 4 étapes principales:

- la conceptualisation (description verbale du système)
- la formulation du modèle
- la phase de test qui permet de vérifier la solidité du modèle
- l'implémentation du modèle qui doit permettre le transfert des connaissances aux utilisateurs

Ces 4 étapes sont nécessairement reliées dans un processus itératif.

Avant que les 4 orateurs de cette session abordent des exemples, un peu d'histoire est aussi utile pour situer le contexte.

Pour les projets à buts multiples, les méthodes participatives ont été développées au USA au début du XX^e siècle et ont été appliquées ensuite seulement en Europe. On peut penser par exemple aux Agences de l'eau (sous la tutelle de 2 Ministères en France) qui agissent avec les comités de bassins, sorte de Parlements de l'eau. Il existe actuellement 6 Agences en France qui se financent à travers les redevances perçues proportionnellement aux quantités d'eau prélevées ou consommées.

Les méthodes participatives en hydraulique sont donc définies comme des assemblées de partenaires qui se réunissent périodiquement pour discuter ou négocier la gestion des rivières, des fleuves ou des bassins versants. Ces méthodes comprennent trois éléments: les acteurs, le projet et le processus.

Les bases légales de ces méthodes se retrouvent:

- pour les pays signataires, dans l'Agenda 21 défini lors de la conférence de Rio (ONU 1992);
- pour l'Europe, dans la Directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE (Europäische Wasserrahmenrichtlinie) qui entend impulser une

*Wasserbau
Hochwasserschutz*

politique de l'eau plus cohérente, en posant le cadre européen d'une gestion et d'une protection des eaux par district hydrographique;

- pour la Suisse dans quelques lois (LAT, LEaux, LACE, LFH, etc.), complétées par des directives comme «Idées directrices Cours d'eau suisses pour une politique de gestion durable de nos eaux» de l'année 2003 qui rappelle le principe fondamental du développement durable: réaliser un équilibre entre les aspects écologiques, économiques et sociaux d'un cours d'eau.

En Suisse, les méthodes participatives ont été ou sont utilisées pour des projets intercantonaux de correction de cours d'eau et maintenant en Valais dans le projet de 3^e correction du Rhône où les grandes familles de partenaires ont été désignées.

- Administration cantonale
- Communes
- Associations, Organismes, Sociétés privées ou publiques
- Tout public.

Le projet de 3^e correction du Rhône a débuté en avril 1995 par une décision du Conseil d'Etat. Dès le début du projet, il ne s'agissait pas seulement d'assurer la sécurité des biens et des personnes en cas de crue, mais aussi d'améliorer le potentiel écologique du fleuve, en prévoyant une revitalisation importante du milieu naturel et en prenant en considération les aspects socio-économiques.

Novembre 1998: le Conseil d'Etat du Valais décidait d'accorder un mandat à un regroupement de bureaux dans le but d'étudier si une synergie est envisageable entre la 3^e correction du Rhône et la production hydroélectrique.

Septembre 1999: un rapport était rendu en septembre 1999 «Etudes de variantes de paliers et harmonisation des projets».

Janvier 1999: un rapport «Présentation au Conseil d'Etat» relative à la 3^e correction du Rhône était rédigé.

Juin 2000: le rapport de synthèse sur la 3^e correction du Rhône était rédigé et le Grand Conseil l'acceptait en septembre 2000.

Janvier 2003: la 1^{re} séance de mise sur pied du projet par le LCH (EPFL) avait lieu, projet financé à 50% par la CTI et le reste par différents partenaires dont les FMV et le service des forces hydrauliques. Ce projet, intitulé «Synergies possibles pour les aménagements hydrauliques à buts multiples – Développement de conceptions

innovatrices et de méthodologies scientifiques pour l'évaluation de tels aménagements», reprenait l'étude commencée à fin 1998 sur la synergie entre la 3^e correction du Rhône et la production hydroélectrique.

Pour terminer, je me dois de citer un autre exemple de projet multidisciplinaire, c'est le Projet Rhône-Thur réalisé conjointement par l'EAWAG, la WSL, la VAW (EPFZ) et le LCH (EPFL) qui s'étend sur la période 2002 à 2006. L'objectif du projet «Rhône-Thur» est l'élaboration des bases scientifiques permettant la prise de décisions dans des projets de revitalisation des grandes rivières. Des bases quantifiées doivent être élaborées pour des tronçons de la Thur et du Rhône.

Conformément à la philosophie actuelle de la Confédération en matière de protection contre les crues, la planification de mesures contre les déficits de protection doit également prendre en compte les déficits écologiques du cours d'eau. La directive 2001 «Protection contre les crues des cours d'eau» recommande une procédure systématique qui doit garantir un traitement identique de tous les droits des eaux et éviter un point de vue unilatéral

Le module IV («Aménagement des cours d'eau et synergies), partie du projet Rhône-Thur comprend 4 thèmes dont 2 sont présentés cet après-midi:

- Mesures pour la diminution de l'effet de marnage dû au turbinage des centrales hydrauliques.
- Synergies possibles entre la protection contre les crues et les aménagements hydroélectriques au fil de l'eau.

Ce module IV veut renforcer les bases scientifiques sur ces thèmes et les rendre accessibles par des recommandations pratiques.

Contrairement à une approche traditionnelle (orientée sur la fonctionnalité des mesures, en tenant compte de la résistance à l'écoulement et le charriage des sédiments), les projets précédents visent également à garantir la fonctionnalité des mesures de protection contre les crues du point de vue de l'écologie et ceci en exploitant les synergies entre la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie.

Adresse de l'auteur

Dr. Pierre-Benoît Raboud

SFH Valais

Av. du Midi 7

CH-1950 Sion

Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte

*Wasserbau
Hochwasserschutz*

■ Anton Schleiss

Zusammenfassung

Die Wasserkraft spielt eine bedeutende Rolle für die Elektrizitätserzeugung in der Schweiz. Deren weitere Entwicklung, insbesondere der Bau von neuen Flusskraftwerken ist nur möglich, falls die Anforderungen bezüglich der Nachhaltigkeit erfüllt werden können. Neue Projekte müssen neben sozioökonomischen Aspekten auch die Belange des Umweltschutzes befriedigen, indem neue Biotope geschaffen werden. Auf der anderen Seite erfordern die Zunahme der Starkniederschläge und das damit verbundene Hochwasser-Risiko entlang von Flüssen in den nächsten Jahrzehnten erhebliche flussbauliche Massnahmen. Diese haben ebenfalls zum Ziel, die Flüsse zu revitalisieren und ihnen wo möglich mehr Raum zu geben. Es geht darum das Gleichgewicht zwischen Umweltschutz und Hochwasserschutz zu finden.

Im Hinblick auf eine umfassende und ausgewogene nachhaltige Entwicklung muss ein Flusskraftwerk, welches gleichzeitig mehrere Zwecke wie Energieerzeugung, Hochwasserschutz, Schaffung von Naturschutzreservaten und Naherholungsgebieten, Verminderung von Schwall- und Sunkerscheinungen usw. erfüllt, mit einem ganzheitlichen Ansatz entworfen und realisiert werden. Solche wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlagen haben einen bedeutenden Einfluss auf Umwelt, Landschaft, Wirtschaft sowie Gesellschaft und müssen deshalb mit einem multidisziplinären Ansatz entworfen werden, um die Bedürfnisse aller Aspekte und Akteure befriedigen zu können. Die Konzeption einer wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlage ist demzufolge eine äußerst komplexe Problematik, welche von vielen schwer zu vergleichenden und stark interaktiven Parametern beeinflusst wird. Die optimale Auslegung eines komplexen Systems ist nicht von vornherein gegeben, und es müssen neue Methoden bei der gesamtheitlichen Optimierung angewandt werden.

Das multidisziplinäre Forschungsprojekt Synergie nimmt diese Herausforderung wahr, indem innovative Auslegungen sowie Methoden und Strategien zur Analyse der Synergien von wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlagen entwickelt werden. Dabei werden vorerst sämtliche Parameter identifiziert, welche solch komplexe Projekte beeinflussen. Anschliessend werden im Rahmen einer Systemmodellierung ihre Wechselwirkungen analysiert und quantifiziert. Als Fallbeispiel werden die Möglichkeiten von wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlagen im Rahmen der 3. Rhonekorrektion untersucht. Der Beitrag erläutert die Synergien, welche im Rahmen von Mehrzweckprojekten erzielt werden können. Dabei werden die Anforderungen an ein solches Projekt im Rhonetal im Detail diskutiert. Insbesondere wird auf die Beherrschung der Verlandung und den nachhaltigen Betrieb von einer Mehrzweckflussstauhaltung eingegangen. Schlussendlich wird das Forschungsprojekt Synergie vorgestellt, mit welchem die wissenschaftlichen Grundlagen zur Beurteilung und Optimierung von Mehrzweckprojekten erarbeitet werden sollen.

Résumé

La force hydraulique joue un rôle primordial pour la production d'électricité en Suisse. Le développement futur de l'hydroélectricité, surtout concernant la réalisation de nouveaux projets, dépendra avant tout de leur intégration dans le cadre d'un développement durable. Ces développements, tout en répondant aux exigences socioéconomiques, devront également satisfaire la protection de l'environnement en créant des nouveaux biotopes. D'un autre côté, l'aggravation des situations météorologiques extrêmes et l'augmentation du risque des crues sont à l'origine de travaux considérables d'aménagements sur les cours d'eau pour les prochaines décennies. Ces derniers ont également comme objectif de renaturer les cours d'eau et de leur redonner l'espace vital nécessaire. Pour ce faire, il convient de trouver le juste milieu entre le respect de la nature et les exigences de la sécurité contre les crues.

Dans l'optique d'une gestion intégrale et respectueuse du développement durable, la conception d'un aménagement hydraulique fluvial qui satisfait au même temps plusieurs buts comme la production électrique, la protection contre les crues, la création de biotopes, la réduction du marnage, et la création des zones de loisir etc., doit être effectuée selon une approche multi-objectif. Ces aménagements, de par l'ampleur des travaux mis en œuvre, l'impact écologique et paysager qu'ils génèrent, et l'importance économique et sociale qu'ils représentent exigent une conception pluridisciplinaire afin de satisfaire l'ensemble des partenaires sociaux, économiques et écologiques. La conception d'un aménagement hydraulique à buts multiples forme ainsi un système complexe, dont les nombreux paramètres fortement interactifs sont difficilement comparables. A cause des unités très différentes qui doivent être confrontées, l'optimum d'un tel système n'est plus a priori évident et l'optimisation globale nécessite des nouvelles méthodes.

Le projet de recherche multidisciplinaire Synergie reprend ce défi et s'oriente donc vers le développement de conceptions innovatrices ainsi que de méthodologies et de stratégies pour l'analyse des synergies qu'offrent les aménagements hydrauliques à buts multiples. La démarche envisagée consiste à répertorier l'ensemble des paramètres liés à ces ouvrages, à en analyser et en quantifier leurs interactions réciproques et à les modéliser en un même système. Le Rhône, avec ses importants travaux liés à sa 3^e Correction, servira de base pour les cas d'étude.

L'article présente les synergies qui peuvent être réalisées dans le cadre des projets à buts multiples. Les exigences d'un tel projet dans la vallée du Rhône sont discutées en détail. En particulier la problématique de l'alluvionnement et la gestion durable d'une retenue à buts multiples est abordée. Finalement, le projet de recherche Synergie décrit a pour but d'élaborer les bases scientifiques nécessaires pour l'analyse et l'optimisation des projets à buts multiples.

1. Einleitung

Wasserwirtschaftliche Projekte wie Hochwasserschutzprojekte, Wasserkraftanlagen, und Flussrevitalisierungsvorhaben lassen sich heutzutage kaum mehr als Einzweckprojekte realisieren, da die Interessenkonflikte bei solch komplexen Projekten oft unüberwindbar werden und auch die Finanzierung auf Schwierigkeiten stösst. Wasserwirtschaftliche Projekte sind deshalb auf eine ganzheitliche und nachhaltige Basis zu stellen unter Einbezug möglichst vieler Interessen. Dies bedeutet, dass beispielsweise flussbauliche Massnahmen nicht nur im Dienste des Hochwasserschutzes, sondern auch zum Nutzen der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu entwerfen und zu realisieren sind. Um bei der Planung tragfähige Projekte zu erreichen und die Akzeptanz der Hochwasserschutzmassnahmen zu verbessern, müssen neben der Mitwirkung der Betroffenen auch sämtliche möglichen Synergien ausgenutzt werden. Dies kann im Rahmen von innovativen Mehrzweckprojekten geschehen, welche im Sinne eines optimalen Kompromisses mehrere Interessen und Ziele befriedigen. Die 3. Rhonekorrektion ist wohl das bedeutendste Hochwasserschutzprojekt in der Schweiz im 21. Jahrhundert, dessen Realisierung und Auswirkungen sich über mehrere Generationen erstrecken wird. Ganzheitliche und nachhaltige Mehrzweckprojekte im Rahmen dieser 3. Rhonekorrektion sind also von grossem Interesse. Im Rahmen einer ersten Vorstudie für die Rhone im Auftrag des Kantons Wallis (Service des forces hydrauliques) wurden die möglichen Synergien zwischen Hochwasserschutz und Wasserkraft und ökologischer Gerinneaufwertung untersucht (EOS-Stucky-LCH, 1999). Dabei zeigte sich, dass mit den Konzepten Parallelgerinne und kontrollierte Überflutungsbereiche ausserordentlich interessante Synergien möglich wären, welche wirtschaftlich und ökologisch eine sogenannte «Win-Win»-Situation erzielen könnten. Deshalb wird zurzeit diese Vorstudie im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes (Synergie) vertieft. Neben dem Aufzeigen der Synergien und der Vernetzung der Einflussparameter geht es darum, Strategien und Entscheidungsgrundlagen für solche Mehrzweckprojekte zu erarbeiten.

Im folgenden Beitrag werden die möglichen Synergien von Mehrzweckprojekten an grossen Talflüssen aufgezeigt. Insbesondere werden die Anforderungen an ein solches Projekt im Rhonetal diskutiert und die Voraussetzungen für eine optimale Anordnung des Stauraumes erläutert.

tier und ihre Auswirkungen auf die Auslegung und Anordnung verdeutlicht. Anschliessend wird auf die zu erwartenden Ergebnisse des Forschungsprojektes Synergie eingegangen.

2. Mögliche Synergien im Rahmen von Mehrzweckprojekten

Grosse Flüsse in den Alpentälern wie die Rhone wurden meistens im letzten Jahrhundert korrigiert und kanalisiert, was zu einer Verarmung der Flussmorphologie und Gewässerökologie führte. Gleichzeitig wurde der Weg für den Bau von Infrastrukturanlagen wie Strassen, Eisenbahnen und Industrien sowie Schaffung von neuen Siedlungsräumen und Landwirtschaftsflächen geebnet, was erst eine wirtschaftliche Entwicklung dieser Alpentäler ermöglichte. Mit dem Ausbau der Wasserkräfte im Rahmen dieses wirtschaftlichen Aufschwunges wurde auch das Abflussregime der Talflüsse durch die

Speicherbauwerke verändert, wobei die Spitzenenergieproduktion insbesondere im Winterhalbjahr Schwall- und Sunkersecheinungen verursacht. Mit der Besiedelung nahm auch das Hochwasserrisiko in diesen Alpentälern zu, was durch die zunehmende Tendenz der extremen Niederschlagsereignisse noch verstärkt wird. Für die heutigen Anforderungen und Randbedingungen ist die Hochwassersicherheit in vielen Alpentälern ungenügend. Zudem sind in den Ebenen viele Biotope oder ihre Vernetzungen verloren gegangen. Nahholbedarf besteht auch bezüglich Naherholungsgebiete in diesen ausgeräumten Talebenen und entlang den korrigierten Flüssen. Diese Herausforderung besteht auch bei der 3. Rhonekorrektion.

Andererseits ist in den grösseren Flüssen wie Alpenrhein und Rhone noch ein bedeutendes Potenzial von erneuerbarer und CO₂-emissionsfreier Wasserkraft vorhanden. Eine weitere Nutzung dieser Flüsse mit Laufwasserkraftwer-

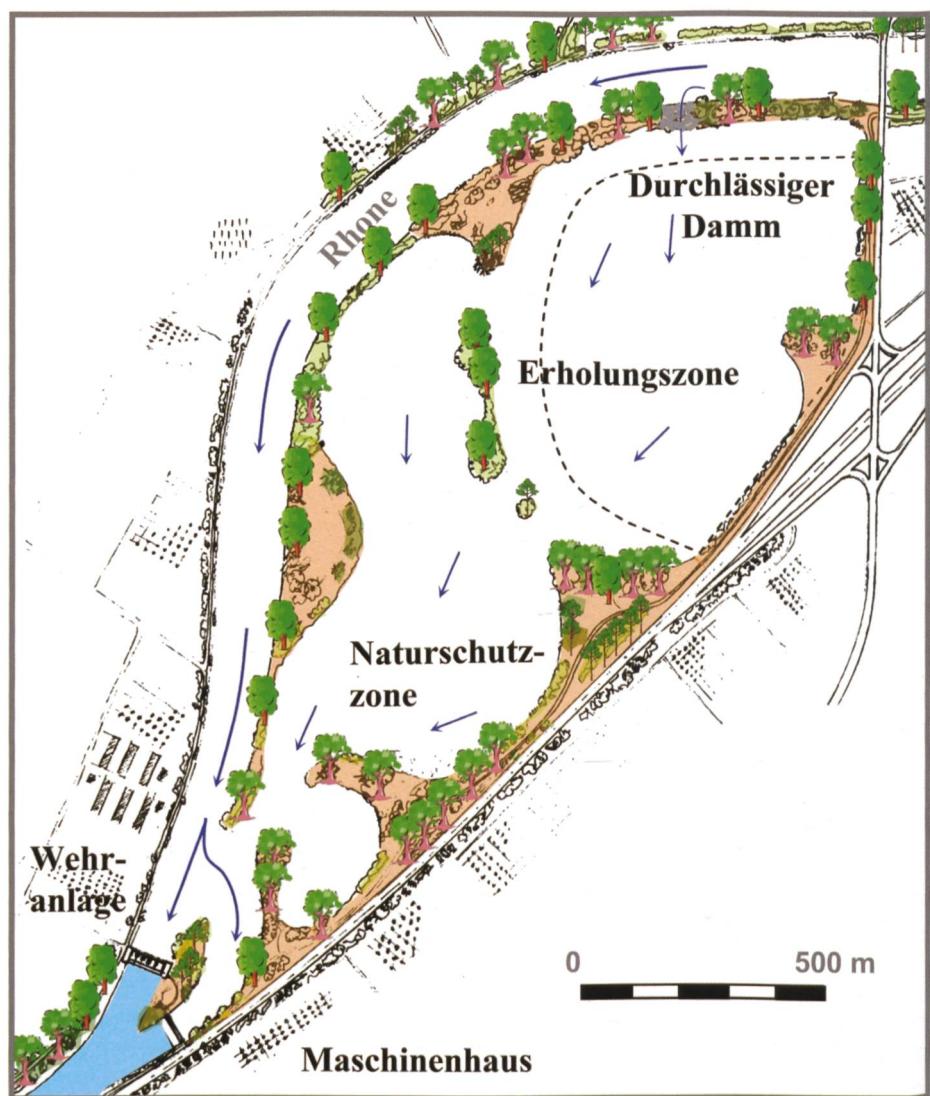


Bild 1. Generelle Anordnung des Stauraumes des Mehrzweckprojektes parallel zum bestehenden Flussbett und Landschaftsgestaltung im bezüglich Verlängerung optimierten Stauraum.

ken ist aber ökologisch, wirtschaftlich und energiepolitisch nur im Rahmen von Mehrzweckprojekten zu vertreten. Die Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes hat einen derartigen Kostendruck verursacht, dass neue Laufwasserkraftwerke nur wirtschaftlich sind, wenn die Kosten mehreren Zielsetzungen zugeordnet werden können. Außerdem müssen sie umweltfreundlich und innovativ ausgelegt werden, so dass beim Energieabsatz ein erhöhter Preis entsprechend dem schärfsten Ökolabel erzielt werden kann.

Eine wasserwirtschaftliche Mehrzweckanlage im oben beschriebenen Kontext müsste also bestmögliche Synergien zwischen folgenden Zielsetzungen erreichen können:

- Hochwasserschutz: Verringerung der Abflussspitze durch Rückhalt und kontrollierte Bewirtschaftung von Überflutungsflächen
- Ökologische Abflussregulierung: Eliminierung von schädlichen Schwall- und Sunkerscheinungen flussabwärts als Beitrag für Flussrevitalisierung
- Schaffung von neuen Biotopen: Flachwasserzonen, Vogelreservate, periodisch überflutete Vegetationsflächen
- Naherholungszonen: Wassersport, Wander- und Reitwege, Freizeitfischerei, zusätzlicher Flussübergang
- Wasserkraftnutzung: Bandenergieproduktion mit ökologischer Abflussregulierung, erneuerbare Energie

Eine wasserbauliche Mehrzweckanlage, welche alle diese Zwecke erfüllen kann, erfordert ein entsprechend grosses Stauvolumen resp. Wasseroberfläche, je nachdem ob ein wesentlicher Beitrag an den Hochwasserschutz geleistet werden soll. Selbstverständlich muss der Stauraum nachhaltig sein, das heisst, so ausgelegt und betrieben werden, dass er nicht durch Verlandung verloren geht.

Im Folgenden werden die Anforderungen für eine solches Mehrzweckprojekt im Rhonetal näher erläutert.

3. Anforderungen an ein Mehrzweckprojekt im Rhonetal

3.1 Konzeption des Speichers

Laufwasserkraftwerke an stark sedimentführenden Flüssen werden normalerweise ohne grosse Speicher geplant, da diese neben der Problematik der Kontinuität des Geschiebetransportes vor allem einer starken Verlandung durch die Schwebstoffabsetzung ausgesetzt sind. Bei einem Mehrzweckprojekt stehen wie erwähnt neben der Stromerzeugung der

Hochwasserschutz, die ökologische Abflussregulierung, die Schaffung von neuen Naturreservaten sowie zusätzlichen Wasserflächen für Freizeitaktivitäten im Vordergrund. Solche Mehrzweckstauanlagen erfordern aber entsprechend grosse Speichervolumen bzw. -oberflächen, die jedoch bezüglich der Verlandung problematisch sind. Für den Entwurf der Morphologie solcher Mehrzweckspeicher müssen deshalb neue Wege beschritten werden.

Um die nachhaltige Nutzung des Mehrzweckstausees zu gewährleisten, muss der zugehörige Stausee zwingend parallel zum bestehenden Flussbett angeordnet sein. Die Abtrennung geschieht durch den bestehenden Hochwasserschutzbau, welcher teilweise gegen den Stauraum abgesenkt ist, so dass er bei Hochwasser überströmt wird. Zusätzlich kann der Damm im oberen Bereich des Stauraumes abschnittsweise durchlässig ausgebildet werden, so dass eine leichte Durchströmung mit wenig sedimentbeladenem Wasser stattfindet (*Bild 1*). Dadurch wird der Stausee normalerweise von der Rhone selbst nicht durchströmt und der Geschiebetransport findet ausschliesslich im bestehenden Flussbett seitlich entlang dem Speicher statt. Eine offene Verbindung zwischen dem Flussbett und der Stauanlage erfolgt erst in unmittelbarer Nähe des Wehres und des Krafthauses. Diese Verbindung muss so ausgestaltet sein, dass die Turbinen möglichst optimal angeströmt werden und gleichzeitig kein Geschiebe sowie keine Feinsedimente in den Stauraum gelangen können. Alpine Flüsse im Generellen und die Rhone im Speziellen sind stark mit Feinsedimenten belastet (bis 5 g/l), welche vorwiegend aus den vergletscherten Gebieten stammen. Das stark befrachtete Wasser wird wegen seiner weissgrauen Trübung deshalb etwa auch als Gletschermilch bezeichnet. Dieser Verlandungsproblematik kann mit einer innovativen Formgebung des Stausees mit mehreren Leitinseln sowie einer optimalen Anordnung der Wehranlage und des Kraftwerkes begegnet werden (Schleiss et al., 2000).

Bei kurzzeitigem Höherstau des Speichers, um die täglichen Schwallwasser der Spitzenkraftwerke aufzufangen und anschliessend dosiert abzugeben, gelangt kurzfristig schwebstoffbeladenes Wasser in den Stauraum. Da aber immer eine schwache Durchströmung des Stauraumes mit sauberem Sickerwasser durch den Damm gewährleistet ist, können sich

die Feinsedimente in der kurzen Zeit nur zu geringem Teil absetzen. In der Nacht wird dann das Schwallwasser grösstenteils wieder an die Rhone zurückgegeben. Um über das Wochenende, wo wenig turbiniert wird, den geringen Rhoneabfluss anzureichern, muss eine grössere Absenkung des Stauraumes erfolgen. Diese bewirkte einen zusätzlichen Spüleffekt. Für die Bewirtschaftung des Stauraumes bezüglich Feinsedimente sei auf Abschnitt 4 verwiesen.

3.2 Hochwasserrückhalt

Um die Spitze eines 100-jährlichen Hochwassers in der Rhone von 1260 m³/s (flussaufwärts von Branson) um rund 200 m³/s zu reduzieren, wäre ein Rückhaltevolumen von 7 bis 8 Mio. m³ erforderlich. Permanente Stauflächen von mehr als 1 km² Fläche dürften in der Rhoneebene kaum realisierbar sein. Dank einer Vorabsenkung von 3 bis 4 m gegenüber dem normalen Betriebsspiegel kann ein solcher Stauraum bei Hochwasserereignissen ein Rückhaltevolumen von 3 bis 4 Mio. m³ zur Verfügung stellen. Dadurch können bereits Abflussengpässe im Unterlauf der Rhone entschärft werden. Um die erwähnte 100-jährliche Abflussspitze um 200 m³/s zu brechen, müsste aber gleichzeitig über einen überflutbaren Dammabschnitt im Stauwurzelbereich eine Überflutungszone von weiteren 3 bis 4 Mio. m³ aktiviert werden. Welcher Beitrag ein Mehrzweckprojekt zum Hochwasserrückhalt leisten kann, hängt also stark vom verfügbaren Stauraum bzw. Staufläche ab und ob im Staukurvenbereich noch zusätzliche Überflutungszonen mobilisiert werden können.

3.3 Ökologische Abflussregulierung

Neben dem eigentlichen Hochwasserschutz kann der Speicher die täglichen, unnatürlichen Abflusschwankungen in der Rhone dämpfen, welche durch die Wasserrückgaben der Speicherkraftwerke flussaufwärts verursacht werden. Die relativen Schwall- und Sunkerscheinungen sind vor allem in den Wintermonaten erheblich, wobei in extremen Jahren tägliche Abflusschwankungen von bis zu 1 m und wöchentliche von bis 1,3 m entstehen können. Der Stauraum erlaubt diese Schwall- und Sunkerscheinungen nahezu vollständig auszugleichen und wieder ein natürliches Abflussregime herzustellen. Dies erlaubt eine erhebliche ökologische Aufwertung der Rhone flussabwärts im Rahmen von Revitalisierungsmaßnahmen. Der Stauraum (Annahme

1 km² Fläche) müsste in der Nacht und in den frühen Morgenstunden leicht abgesenkt werden (0,3 bis 0,5 m), um den geringen Rhoneabfluss anzureichern. In den Spitzenzeiten des Turbinierbetriebs der Speicherwerkwerke wird dann die Schwallwelle durch einen täglichen Aufstau des Stausees um 0,7 bis 1,0 m gebrochen. Dadurch lassen sich die täglichen Spiegelschwankungen an einem Wochentag im Winter von heute max. 1 m auf zukünftig wenige cm entsprechend einem unbeeinflussten Regime reduzieren. Zusätzlicher Speicherraum wäre nötig, um auch die Rhone am Wochenende wieder auf einen natürlichen Abfluss anzureichern. Dadurch ergäbe sich eine zusätzliche Spiegelabsenkung am Wochenende von 1 bis 2 m.

Da der Turbinierbetrieb der Speicherwerkwerke im Sommerhalbjahr stark reduziert ist und die Rhone einen höheren Basisabfluss aufweist, sind die anthropogenen Schwall- und Sunkerscheinungen erheblich geringer. Sie könnten mit sehr geringen Spiegelschwankungen im Stauraum ausgeglichen werden (weniger als 0,5 m), so dass Freizeitaktivitäten nicht beeinträchtigt würden. Es muss beachtet werden, dass im Sommer die Rhone als alpiner Gebirgsfluss mit einem stark vergletscherten Einzugsgebiet schon täglichen natürlichen Abfluss- und Pegelschwankungen unterworfen ist.

3.4 Grundwasserspiegel

Um eine merkliche Beeinflussung des Grundwasserspiegels auszuschliessen, sollte die permanente Stauhöhe des Speichers bei geschlossenem Wehr 5 bis 7 m nicht übersteigen. Eine solche Wasserspiegelhöhe wird regelmäßig auch in der nicht zurückgestauten Rhone bei jährlichen Hochwasserabflüssen erreicht. Der Stauraum kann zudem zusätzlich von einem Drainagekanal umgeben sein, welcher den Grundwasserspiegel im Umgelände fixiert. Es ist auch zu erwähnen, dass mit der Zeit eine Komatierung der Sohle im Stauraum stattfinden wird, so dass der Austausch mit dem Grundwasser vernachlässigbar klein wird.

3.5 Erholungs- und Naturschutzzone

Der Speicher kann mit Inseln und Einengungen, welche ab bestimmten Hochwassern überflutet werden, in geschützte Zonen und solche mit zugelassenen Freizeitaktivitäten unterteilt werden (Bild 1). Mit Flachwasserzonen in Ufernähe können die Voraussetzungen geschaffen werden, dass sich Teile des Stauraumes

im Laufe der Zeit zu einem Naturreservat entwickeln. Insbesondere periodisch überflutete Zonen entlang der Ufer sind ökologisch wertvoll, da Auengebiete selten geworden sind. Deren Überflutung kann durch den Wehrbetrieb während Hochwasserabflüssen nach ökologischen Grundsätzen gesteuert werden. Ein abgegrenzter Teil der Staufläche kann für Freizeitaktivitäten (Wassersport, Fischen usw.) und Erholungsraum zugänglich gemacht werden. Da der Stauraum von der Rhone nicht durchflossen ist, wird sich die Wassertemperatur im Sommer erhöhen, was sowohl für Freizeitaktivitäten als auch für das Naturreservat von Vorteil ist. Zudem sind wie unter 3.3 erwähnt die Spiegelschwankungen im Sommerhalbjahr infolge der ökologischen Abflussregulierung im Stauraum sehr gering.

3.6 Wasserkraftnutzung

Die in einer ersten Machbarkeitsstudie untersuchte Wasserkraftanlage besteht aus dem eigentlichen Maschinenhaus und einem regulierbaren Wehr, welches mittels 5 Segmentschützen (HxB = 6x13 m) mit aufgesetzter Klappe (H=2 m) einen Abfluss von 1600 m³/s (1000-jährliches Hochwasser) entlasten kann. Krafthaus und Wehranlage sind durch eine Leitinsel getrennt, welche auch das Rauigerinne für den Fischauftakt beherbergt (Bild 2). Ein mit 5 konventionellen Rohrturbinen ausgerüstetes Maschinenhaus könnte bei einer Nettofallhöhe von 6,0 m und einer Ausbauwassermenge 200 m³/s, welche an 65 Tagen im Jahr überschritten wird, eine mittlere Jahresproduktion von rund 43 GWh ermöglichen. Denkbar wären auch neuere Turbinenentwicklungen, wie Matrixturbinen (Schmid, 2000; Schmid et al., 2002).

3.7 Umgehungsgerinne als Fischauf- und -abstiegshilfe

Die Durchgängigkeit von Wehr und Kraftwerk könnte durch ein Umgehungsgerinne gewährleistet werden, welches beispielsweise in der Trenninsel zwischen Wehr und Kraftwerk angeordnet ist (Bild 2). Dieses müsste mit einer bedeutenden Abflussmenge dotiert werden (bis zu 5 m³/s), um eine ausreichende Lockströmung zu verursachen. Unterwasserseitig sollte der Einstieg möglichst nahe dem Turbinenauslauf resp. dem Unterwasserkanal angeordnet werden. Falls das Umgehungsgerinne auch für den Abstieg wirksam sein soll, müsste der oberwasserseitige Einstieg in der Nähe der Turbineneinläufe liegen. Das Umgehungsge-

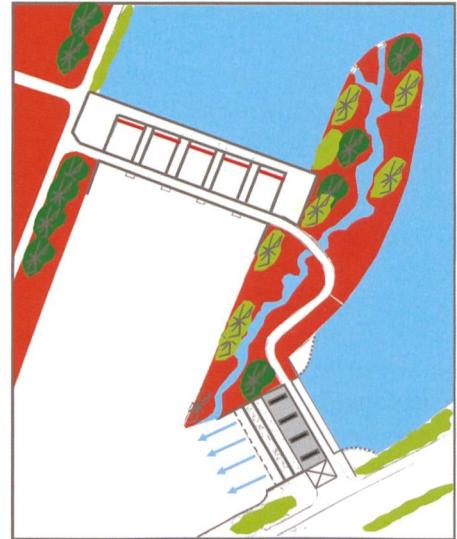


Bild 2. Schematische Anordnung von Wehr (links), Kraftwerk (rechts) und Trenninsel mit Umgehungsgerinne. Um das Gefälle des Umgehungsgerinnes zu beschränken, kann die Trenninsel resp. der Unterwasserkanal unterwasserseitig verlängert werden.

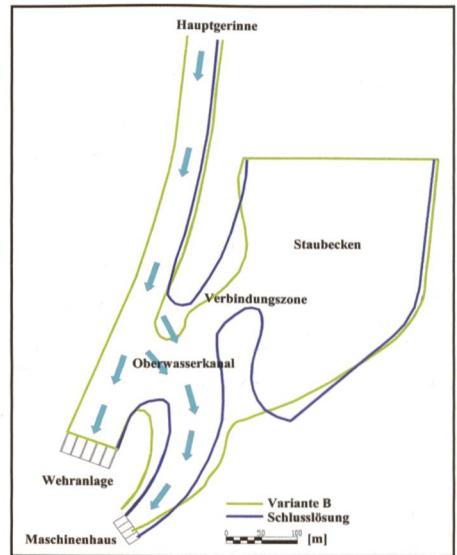


Bild 3. Schlussendlich gewählte Anordnung mit Modifikationen gegenüber der rein hydraulisch optimalen Lösung.

rinne könnte wildbachartig mit einer Becken- und Schnellenstruktur ausgestaltet sein. Das Gefälle sollte aber 1 bis 2% nicht überschreiten, so dass eine Gesamtlänge des Umgehungsgerinnes von etwa 300 bis 500 m nötig wäre.

4. Beherrschung der Verlandung durch innovative Anordnung und Nutzung

4.1 Optimierung der Anströmverhältnisse

Um die Verlandung des Speichers beherrschen zu können, wurde in einer ersten Machbarkeitsstudie eine innovative

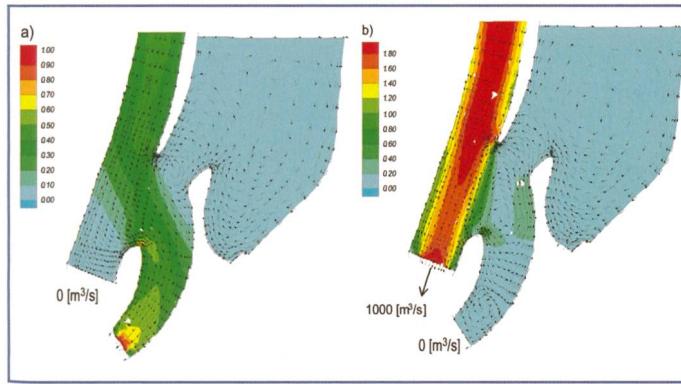


Bild 4. Strömung und Geschwindigkeitsverteilung für die gewählte Anordnung: a) Normalbetrieb des Maschinenhauses mit $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (links), b) Hochwasserabfluss mit $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ über Wehr (rechts).

Anordnung von Staubecken und Wasserkraftanlage entwickelt, welche mit numerischen Simulationen bezüglich Anströmung und Sedimenttransport optimiert wurde (Irneriger, 2000; Schleiss et al., 2000; Bollaert et al., 2000). Dabei wurde eine hydraulisch optimale Anordnung des Stauraumes mit guten Anströmbedingungen zum Maschinenhaus gesucht. Im Weiteren sollte im Normalbetrieb möglichst wenig Wasser vom Oberwasserkanal des Maschinenhauses über die Verbindungszone in den Stauraum gelangen (Bild 3). Um diese Bedingungen zu befriedigen wurden mehrere Varianten für die zwei folgenden Abflussbedingungen untersucht:

- Normalbetrieb des Maschinenhauses mit der Ausbauwassermenge von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (an 65 Tagen im Jahr überschritten) ohne Wehrabfluss
- Hochwasserabfluss mit $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Wiederkehrperiode von etwa 60 bis 70 Jahren) ohne Betrieb des Maschinenhauses

Die schlussendlich gefundene, hydraulisch optimale Lösung ist durch eine ausgezeichnete Anströmung des Maschinenhauses im Normalbetrieb gekennzeichnet (Bild 3, Variante B). Um zusätzlich das Risiko des Sedimenteneintrages in den Stauraum zu verringern, wurden die Geometrie des Oberwasserkanals sowie die Verbindungszone zum Stauraum weiter modifiziert (Bild 3, Schlusslösung).

Mit diesen Modifikationen konnte die gleichmässige Abflussverteilung im Zulaufkanal zum Maschinenhaus beibehalten werden, wobei die lokal maximalen Geschwindigkeiten auf $0,6 \text{ m/s}$ begrenzt werden konnten (Bild 4). Beim Normalbetrieb des Maschinenhauses ($200 \text{ m}^3/\text{s}$) gelangen nur $3 \text{ m}^3/\text{s}$ vom Oberwasserkanal über die Verbindungszone in den Stauraum (Bild 4a). Dieser Abfluss in Richtung

Stauraum steigt bei Hochwasser ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$) auf $40 \text{ m}^3/\text{s}$ an (Bild 4b).

4.2 Optimierung hinsichtlich Sedimenteneintrag in den Stauraum

Das Verhalten dieser optimierten Anordnung bezüglich Verlandung wurde vorerst mit einer Simulation über 24 Stunden im Normalbetrieb untersucht. Die ermittelten Verlandungsstärken haben also nur qualitativen Charakter. Zwei bedeutende Verlandungszonen konnten mit der Simulation identifiziert werden (Bild 5). Die erste befindet sich im Hauptgerinne stromaufwärts des Wehres. Die zweite erstreckt sich in den Oberwasserkanal und die Verbindungszone zum Stauraum (Bild 5a). Diese Ablagerungen können während grösseren Hochwasserabflüssen leicht wieder aufgewirbelt und als Suspension weiter flussabwärts transportiert werden. Die detaillierte Analyse gemäss der Theorie von Hjulström (1935) zeigt aber, dass alle Ablagerungen in der Transportzone liegen und also auch in Sohlennähe als Geschiebe weiterverfrachtet werden können (Bild 5b). In der Verbindungszone zwischen Oberwasserkanal und Stauraum entsteht eine Rückströmung, deren Geschwindigkeit ausreicht, um im Oberwasserkanal abgelagerte Sedimente in Bodennähe in den Stauraum zu verlagern.

Wie in Abschnitt 3.6 erwähnt wird das Staubecken stetig von einem minimalen Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ durchflossen. Dieser unterdrückt eine grossräumige Rotationsströmung oberwasserseitig der Verbindungszone des Oberwasserkanals mit dem Staubecken. Dadurch wird eine Absetzung der als Suspension über die Verbindungszone in den Stauraum gelangten Feinsedimente verhindert. Hingegen beeinflusst dieser Durchströmabfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ die Ablagerungs- und Transportzo-

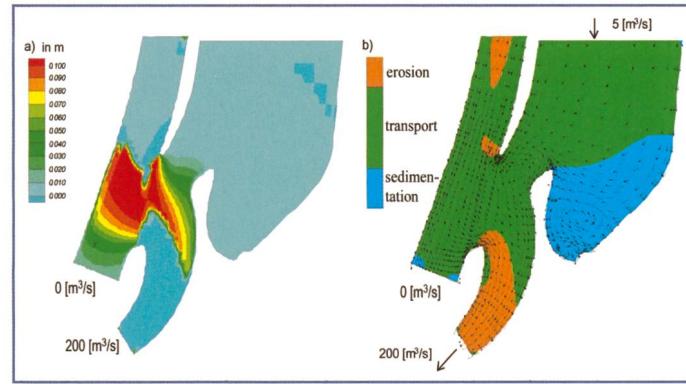


Bild 5. a) Berechnete Verlandungszonen ($dm = 0,02 \text{ mm}$, Simulationsdauer 24 h , Suspensionsfracht 1 g/l). b) Erosions-, Transport- und Ablagerungszonen gemäss Hjulström. Durchströmung des Staubeckens mit $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

nen in der eigentlichen Verbindungszone nur unmerklich.

4.3 Einfluss des Kraftwerkbetriebs auf die Verlandung

Bis zur Ausbauwassermenge von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ bleibt die Wehranlage geschlossen. Bei grösseren Abflüssen wird das Wehr kontinuierlich geöffnet, um den Oberwasserspiegel konstant zu halten. Bezuglich Sedimenteneintrags in das Staubecken stellt sich die Frage, ob bei grösseren Hochwasserabflüssen der Kraftwerkbetrieb nicht besser eingestellt und der ganze Abfluss über die Wehranlage geleitet werden soll. Diese Frage wurde für ein 10-jährliches Hochwasser von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ untersucht (Bild 6). Dabei wurde der Fall mit Kraftwerkbetrieb (Bild 6a: $200 \text{ m}^3/\text{s}$ über Krafthaus, $400 \text{ m}^3/\text{s}$ über Wehranlage) mit demjenigen ohne Kraftwerkbetrieb (Bild 6b: $600 \text{ m}^3/\text{s}$ über Wehranlage) verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Einstellung des Kraftwerkbetriebes bei grossen Hochwasserabflüssen vorteilhaft ist, indem die Absetzung von sehr feinen Sedimenten ($d_m = 0,02 \text{ mm}$) im Oberwasserkanal stark reduziert wird und die gröberen Körner ($d_m = 0,08 \text{ mm}$) als Suspension direkt durch die Wehranlage transportiert werden.

4.4 Wirksamkeit der Spülungen

Nach Abklingen eines Hochwassers können durch Öffnen der Wehrschrüten die im Oberwasserkanal und im Staubecken abgesetzten Sedimente gespült werden. Voraussetzung ist allerdings, dass mit der Spülung die kritischen Erosionsgeschwindigkeiten gemäss Hjulström in Sohlennähe erreicht werden. Diese kritischen Geschwindigkeiten ergeben sich, falls der Stauraum durch eine «Spülwassermenge» von mindestens $200 \text{ m}^3/\text{s}$ durchströmt wird. Um diesen Durchfluss

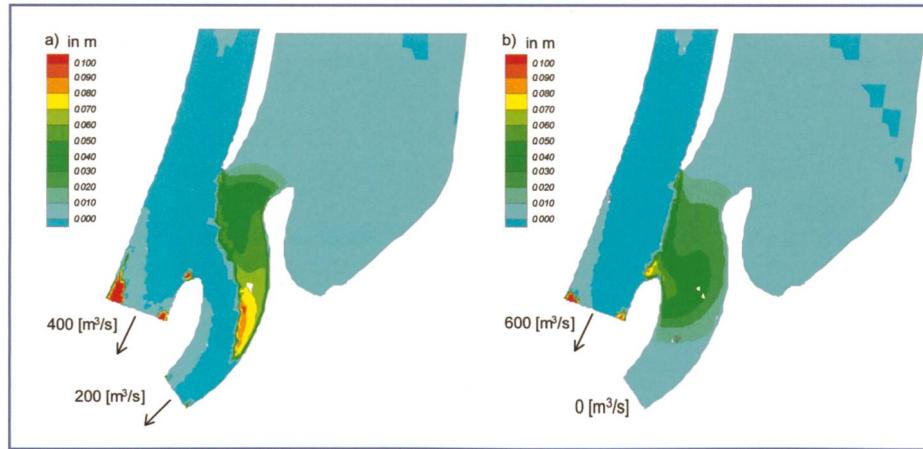


Bild 6. Einfluss des Kraftwerksbetriebs auf die Verlandungszonen ($dm = 0,02 \text{ mm}$, Simulationsdauer 24 h, Suspensionsfracht 1 g/l). Durchströmung des Staubeckens mit $5 \text{ m}^3/\text{s}$. a) $200 \text{ m}^3/\text{s}$ über Krafthaus, $400 \text{ m}^3/\text{s}$ über Wehranlage. b) Gesamter Abfluss von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ über Wehranlage.

zuerzeugen, muss der Spiegel im Stausee kurzzeitig um 2 m abgesenkt werden.

Die Wirksamkeit dieses Spülvorganges ist in *Bild 7* für verschiedene Korngrößen verdeutlicht ($d_m = 0,02 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$ und $2,00 \text{ mm}$). Es kann festgestellt werden, dass die Spülung im Hauptgerinne, im Oberwasserkanal sowie in der Verbindungszone zum Stauraum wirksam ist, da die kritischen Erosionsgeschwindigkeiten im Bereich der grössten Ablagerungen erreicht werden (vgl. *Bilder 3, 4 und 5*).

Je nach Korngrösse der abgelagerten Sedimente können die Bereiche im Staubecken, welche in der Transport- und Ablagerungszone liegen, nicht freigespült werden. Die im Ansatz von Hjulström berücksichtigte Kohäsion der Feinsedimente erklärt, wieso der Spülvorgang bei $d_m = 0,02 \text{ mm}$ weniger effizient ist (*Bild 7b*) als bei gröberen Ablagerungen mit $d_m = 0,2 \text{ mm}$ (*Bild 7c*).

5. Wissenschaftliche Grundlagen zur Beurteilung und Optimierung von Mehrzweckprojekten – Forschungsprojekt Synergie

5.1 Synergie – ein interdisziplinäres Forschungsprojekt

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden von einem interdisziplinären Forschungsteam, welches sich aus Bauingenieuren (Wasserbauer), Umweltingenieuren und Architekten zusammensetzt, sämtliche technischen, ökologischen und sozioökonomischen Einflussparameter des Mehrzweckprojektes und deren Wechselwirkungen analysiert. Dies erlaubt die kritischen Parameter zu identifizieren und Strategien zu entwickeln, mit

welchen die bestmöglichen Synergien genutzt werden können.

In einem anwendungsorientierten Teil werden in Zusammenarbeit mit Industriepartnern (Ingenieurbüro und Turbinenfabrikanten) konstruktive, bauliche und betriebliche Grundlagen für die Anordnung von Mehrzweckprojekten an Flüssen erarbeitet, wobei die Rhone als Fallstudie betrachtet wird. Das Forschungsprojekt soll schlussendlich Antworten auf folgende Fragen geben:

- Wie können Synergien zwischen Flusskraftwerken und Hochwasserschutz zum Vorteil der Umwelt genutzt werden?
- Welche Konzeption ist für die Flusskraftwerke zu wählen, damit ökologische gesellschaftliche Vorteile entstehen (Verbesserung des Abflussregimes, Auenwälder, Naturreservate, Naherholung usw.)?
- Welches sind die kritischen Einflussfaktoren, von welchen der Erfolg eines Mehrzweckprojektes abhängt?
- Welche Strategien liefern die besten Synergien zwischen Wasserkraft, Hochwasserschutz und Umwelt?

Im Folgenden werden die verschiedenen Teilprojekte kurz vorgestellt.

5.2 Erarbeitung von konzeptionellen Grundlagen für flussbauliche Mehrzweckprojekte

Verschiedene Varianten für die Anordnung von Laufwasserkraftwerken, welche mit einem Flachwasserspeicher kombiniert sind, werden in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner erarbeitet. Ziel ist moderne, innovative Technologien anzuwenden, welche zu minimalen Investitions- und Stromgestehungskosten führen. Die entsprechenden Konzepte müssen

den kritischen Umweltbeeinflussungen Rechnung tragen (z.B. Grundwasserbeeinflussung in der Rhoneebene). Von besonderem Interesse sind innovative Anordnungen, welche ökologisch vertretbar sind und diesbezüglich Vorteile bringen können.

5.3 Wissenschaftliche Grundlagen zur gesamtheitlichen Beurteilung von Mehrzweckprojekten

Wasserwirtschaftliche Mehrzweckanlagen sind äusserst komplexe Projekte, deren Analyse und Optimierung besondere Methoden erfordert, da viele Projektfaktoren nicht direkt quantifizierbar sind. Deshalb wird eine neue Methodik erarbeitet, welche die Auswirkungen von technischen Entscheidungen bei der Projektplanung auf die Umwelt im Sinne einer Optimierung evaluieren kann. Dabei wird vorerst die Vernetzung der verschiedenen Einflussfaktoren nach der Methode von Gomez und Probst (1995) aufgezeigt. Berücksichtigt werden dabei die Aspekte der Zeit und der Intensität der einzelnen Einflussfaktoren. Eine Analyse der Interaktionen erlaubt die kritischen Projektfaktoren zu identifizieren. Aufgrund der kritischen Einflussgrössen des Projektes können Strategien entwickelt werden, welche es erlauben, Projektvarianten mit den grössten Synergien und somit der besten Akzeptanz zu finden. Die Systemanalyse kann zudem die Grundlage für den Schlüssel des Kostenteilers liefern, welcher für den Erfolg eines Mehrzweckprojektes entscheidend ist.

5.4 Ökologische und landschaftsplanerische Grundlagen für Mehrzwecklaufwasserkraftwerke

Um eine optimale Synergie zwischen ökologischen und wasserwirtschaftlichen Aspekten ausschöpfen zu können, sind auch Modelle erforderlich, welche die Funktionalität von Ökosystemen analysieren können. Diese sollen erlauben, die Wirkung von technischen Entscheidungen bezüglich Projektkonzeption auf die Umwelt zu quantifizieren. Neben der Analyse der Ökosysteme wird auch auf die landschaftsplanerische Eingliederung der Mehrzweckanlage geachtet. Schliesslich werden auch Aspekte der Kommunikation und Partnerschaft im Rahmen von Mehrzweckprojekten untersucht.

6. Schlussfolgerungen

Erste Ergebnisse des interdisziplinären Forschungsprojektes Synergie zeigen,

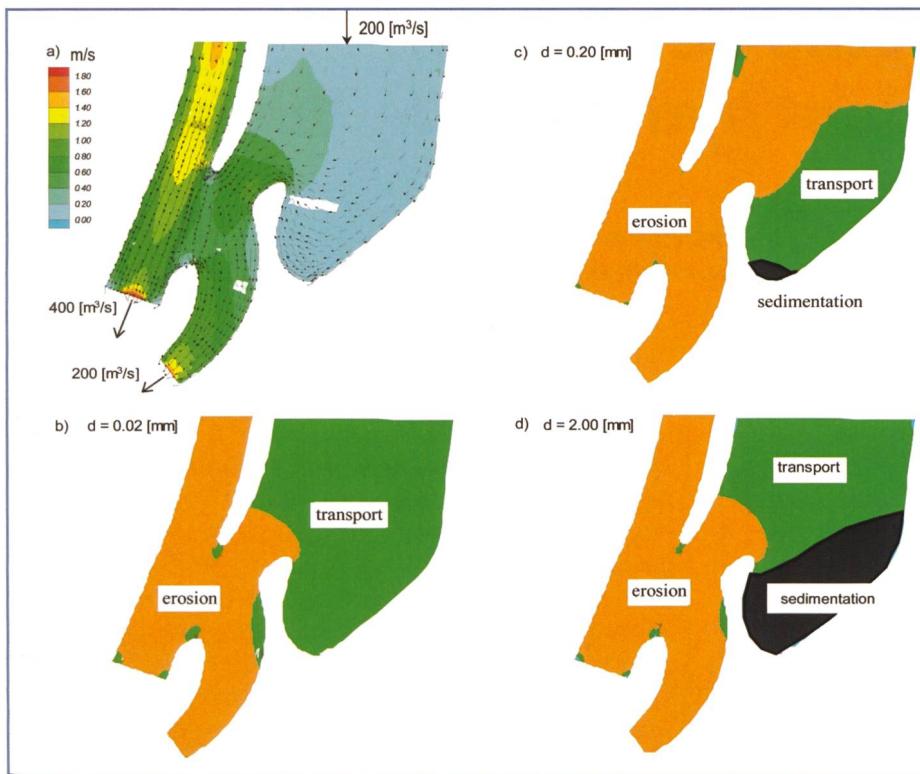


Bild 7. Wirksamkeit der Spülung durch Absenken des Stauspiegels um 2 m und Erzeugen einer Durchströmung von 200 m³/s. a) Strömungsbild und Geschwindigkeiten während Spülung. b) Erosions-, Transport- und Ablagerungszonen gemäss Hjulström für dm = 0,02 mm. c) Dito für dm = 0,2 mm. d) Dito für 2,00 mm.

dass mit einer wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlage äusserst wertvolle Synergien zwischen Hochwasserschutz, Wasserkraft, ökologischer Flussaufwertung und Naherholung erzielt werden könnten. Mit einer zur Energieerzeugung genutzten Staustufe könnten die Hochwasserspitzen deutlich reduziert werden sowie die Schwall- und Sunkerscheinungen flussabwärts nahezu gänzlich eliminiert werden. Ziel des Forschungsprojektes Synergie ist es in erster Linie, die wissenschaftlichen Grundlagen zur Beurteilung und Optimierung von komplexen Mehrzweckprojekten zu erarbeiten. Im Rahmen von Fallstudien sollen zudem konkrete Konzeptvorschläge erarbeitet werden, welche für die 3. Rhonekorrektion diese Synergien verdeutlichen und die Vernetzung der Einflussparameter aufzeigen. Damit soll neben der Strategie auch eine Entscheidungsgrundlage für den Kostenteiler eines solchen Mehrzweckprojektes erarbeitet werden.

Die Anforderungen an eine wasserwirtschaftliche Mehrzweckanlage, welche sämtliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, ökologischer Abflussregulierung, Grundwasser, Erholungs- und Naturschutzzonen, Fischdurchgängigkeit, Wasserkraftnutzung usw. nutzt, konnten bereits identifiziert werden. Mit Hilfe der im Rahmen des Projektes Synergie er-

arbeiteten wissenschaftlichen und technischen Grundlagen sollte es möglich sein, eine Mehrzweckanlage zu definieren, welche einen nachhaltigen Nutzen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft garantiert.

Laufwasserkraftwerke an stark sedimentführenden Flüssen mit flächenmäßig grossen Stauräumen sind mit Verlandungsproblemen konfrontiert, welche die Nachhaltigkeit der Mehrzweckanlage gefährden können. Im Rahmen von ersten Machbarkeitsstudien konnte gezeigt werden, dass mit einer innovativen Gestaltung des Zulaufbereiches zum Kraftwerk und der Verbindungszone zum Staubecken dessen Verlandung selbst bei stark sedimentbefrachteten Zuflüssen beherrscht werden kann. Voraussetzung ist allerdings, dass das Staubecken parallel zum Hauptgerinne angeordnet wird und somit die Geschiebedurchgängigkeit gewährleistet ist.

Literatur

- Bollaert, E., Irniger, Ph., Schleiss, A. (2000). Management of sedimentation in a multiple reservoir in a run-of-river powerplant project on an Alpine river, Proceedings of HYDRO 2000 – Making Hydro more Competitive, Session III: Sediment Management, 2–4 October, Berne, Switzerland, pages 183–192, 2000.
 EOS – Stucky – LCH (Schleiss) (1999). 3^e correction

du Rhône – Synergie possible avec des paliers de production hydroélectrique – Etude de faisabilité, Etude mandatée par le Département de la santé, des affaires sociales et de l'énergie du Canton du Valais.

Gomez P., Probst G. (1995). Die Praxis des gesamtheitlichen Problemlösens, Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien.

Hjulström, F. (1935). Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris., Bulletin, Geological Institute of Upsala, Vol. XXV, Upsala, Sweden, 1935.

Schleiss, A., Bollaert, E., Irniger, P. (2000). Beherrschung der Verlandung in einem Mehrzweckstausee eines Laufkraftwerkes an einem stark sedimentführenden Fluss, Proceedings Wasserbau Symposium «Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen», 19–21 October, Graz, Austria, no 34, pp. 534–552, 2000.

Schmid, Wolfartsberger (2002). An innovative technology for hydraulic energy generation, IMECE, London, 2002.

Schmid (2000). Neues Zeitalter der Wasserkraft, VA Tech hydro News, 2000.

Verdankung

Das Forschungsprojekt Synergie wird von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) unterstützt (Projekt Nr. 6794.1). Finanzielle Partner des Projektes sind: Forces Motrices Valaisannes (FMV), Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG – OFEG), Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (SWV), Service des Forces Hydrauliques – Etat du Valais.

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Anton Schleiss
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
 Bât. GC, Station 18
 CH-1015 Lausanne
 +41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
 anton.schleiss@epfl.ch

Analyse et objectifs de gestion d'un aménagement hydraulique fluvial à buts multiples

■ Philippe Heller

*Wasserbau
Flussbau*

Résumé

Dans les pays où le potentiel hydroélectrique est déjà fortement exploité, de nouveaux barrages ne peuvent trouver une approbation générale que comme projets à buts multiples. A côté des objectifs techniques (production d'énergie, contrôle des crues et irrigation), les aménagements hydroélectriques fluviaux doivent également satisfaire les contraintes environnementales, paysagères et sociales. La réduction du marnage artificiel, le soutien du débit d'étiage, la création de biotopes et de zones de loisirs autour du réservoir en sont des exemples.

Traditionnellement ces aspects sont traités séparément (United Nations, 1972). La mise en commun de ces différents objectifs accroît le degré de complexité du projet. Une méthodologie capable d'appréhender cette complexité est nécessaire pour développer les synergies entre les buts proposés. La méthode choisie comprend une analyse qualitative complétée par une étude quantitative.

L'analyse qualitative est effectuée par une méthode holistique de réflexion en réseau, telle que proposée par Probst et Gomez. Les résultats mettent en valeur trois groupes de variables, celles qui influencent la taille du projet, celles qui influencent la gestion du projet et celles qui permettent de quantifier l'état du système obtenu. Cette analyse souligne particulièrement les impacts issus du marnage.

L'analyse quantitative se concentre sur les aspects de gestion du réservoir. Les opérations proposées sont calculées par différentes heuristiques ainsi qu'une technique d'optimisation non-linéaire. Cette technique permet d'améliorer l'état écologique de la rivière aval et d'augmenter les utilisations potentielles du réservoir (création de biotopes, développement de zones de loisirs, production énergétique).

Zusammenfassung

In Ländern, in denen das Wasserkraftpotenzial bereits intensiv genutzt wird, finden neue Laufwasserkraftwerke nur als Mehrzweckprojekt eine allgemeine Akzeptanz. Neben technischen Zielsetzungen (Wasserkraftnutzung, Bewässerung oder Hochwasserschutz) müssen die fluss- und wasserbaulichen Ausbaumassnahmen ebenfalls ökologische, soziale und landschaftliche Aspekte berücksichtigen. Die Reduzierung von Schwall und Sunk, die Gewährleistung eines ausreichenden Mindestabflusses sowie die Schaffung von Biotopen und Freizeitzonen um das Reservoir sind nur einige Beispiele.

Traditionell werden diese Aspekte getrennt behandelt (United Nations, 1972). Eine integrale Betrachtungsweise dieser verschiedenen Zielsetzungen steigert die Komplexität des Projekts. Aus diesem Grund ist eine neue Methodologie erforderlich, die in der Lage ist, diese Komplexität zu erfassen, um Synergien zwischen den angestrebten Zielen herauszuarbeiten. Die ausgewählte Methode umfasst eine qualitative Analyse, die durch eine quantitative Studie vervollständigt wird.

Die qualitative Analyse basiert auf einer ganzheitlichen Methode des vernetzten Denkens, welche von Probst und Gomez entwickelt wurde. Die Resultate heben drei Variabengruppen hervor, jene, die die Grösse des Projekts beeinflussen, jene, die das Projektmanagement beeinflussen, und jene, die erlauben, den Zustand des Systems zu quantifizieren. Diese Analyse unterstreicht im Besonderen die Auswirkungen, die auf Schwall und Sunk zurückzuführen sind. Die quantitative Analyse konzentriert sich auf den Betrieb des Reservoirs. Die vorgeschlagenen Abflüsse werden durch verschiedene heuristische Methoden sowie eine nichtlineare Optimierungstechnik berechnet. Diese Technik ermöglicht, den ökologischen Zustand des Flusses zu verbessern sowie die potenziellen Nutzungen des Reservoirs zu erhöhen (Biotopschaffung, Entwicklung von Freizeitzonen und Energieproduktion).

1. Introduction

Parallèlement à la sensibilité croissante aux problèmes environnementaux, les changements climatiques montrent des situations météorologiques extrêmes aggravées. Ces changements nécessitent, pour des raisons sécuritaires, d'importants travaux sur les cours d'eau. D'autre part, l'espace laissé aux réseaux hydrologiques a fortement diminué. Les populations se sont installées à proximité des rivières ce qui rend leur débordement d'autant plus inacceptables.

Dans les pays développés où le

potentiel hydroélectrique est largement développé, l'implantation de nouveaux aménagements est devenue difficile. Des contraintes écologiques, sociales ou politiques font souvent obstacles à des projets intéressants mais analysés seulement d'un point de vue technique ou économique. Pour répondre à cette problématique, de nombreuses méthodes participatives ont été développées (Leach & al., 2001). Elles incluent, dès les premières phases du projet, l'ensemble des partenaires potentiels. Ces méthodes ont pour but d'aboutir à un compromis raisonnable.

Pour ce faire, elles favorisent des projets à buts multiples.

Un projet à buts multiples génère un système complexe avec des effets rétroactifs. Son étude doit considérer les perspectives de tous les acteurs. Les variables du projet avec leurs rétroactions doivent également être modélisée avec consistance.

Selon Flug & al. (2000) et Cai & al. (2004), les buts possibles pour un barrage fluvial peuvent être répartis dans trois catégories: hydraulique, écologique et socio-économique. La production éner-

gétique, la protection contre les crues, l'irrigation et la navigation forment la première catégorie. L'écologie des rivières, la réduction du marnage artificiel et la création de biotopes forment la seconde catégorie. La pêche, les zones de récréation et l'intégration paysagère forment la dernière catégorie.

La littérature souligne que les systèmes complexes doivent être analysés distinctement par un modèle qualitatif et un modèle quantitatif (Coyle, 2000). Les systèmes dynamiques sont définis comme «une méthode d'analyse des systèmes complexes faite par une analyse causale, suivie d'une transcription dynamique, complétée par un modèle et terminée par une simulation informatique» (EuroDicauTom, 1982). La considération de chacun des aspects proposés du projet à buts multiples requiert ainsi initialement une analyse qualitative. Dans un second temps, l'analyse quantitative doit spécifier les aspects purement numériques. Le but de cette méthodologie appliquée à des projets hydrauliques est de développer des synergies au sein de ces ouvrages de sorte à augmenter leur degré d'acceptabilité.

Cet article se concentre sur les aménagements hydroélectriques fluviaux qui possèdent un réservoir de faible profondeur. Le but principal est de laminer le marnage artificiel et de réduire les pointes des crues. Un projet semblable est académiquement étudié sur le Rhône valaisan (Bollaert & al., 2000). A cause de ses nombreux réservoirs alpins, le régime du Rhône subit une influence journalière et saisonnière (marnage journalier et report saisonnier). Les nombreux glaciers du bassin versant provoquent dans le Rhône une eau fortement chargée en sédiments fins.

2. Analyse quantitative

2.1 Méthode de Probst et Gomez

Développée par deux socio-économistes (Gomez & al., 1995), cette approche holistique de réflexion en réseau est constituée de cinq étapes (Figure 1). «Identifier le problème» en le regardant sous différents angles, permet de «comprendre les relations» qui existent entre les différents partenaires du problème. Cette analyse, par la mise en évidence des facteurs-clés, conduit à «élaborer des solutions». Leur «analyse» par le biais d'indicateurs permet de prendre les mesures nécessaires pour «réaliser la solution» la plus prometteuse. La réalisation génère une nouvelle

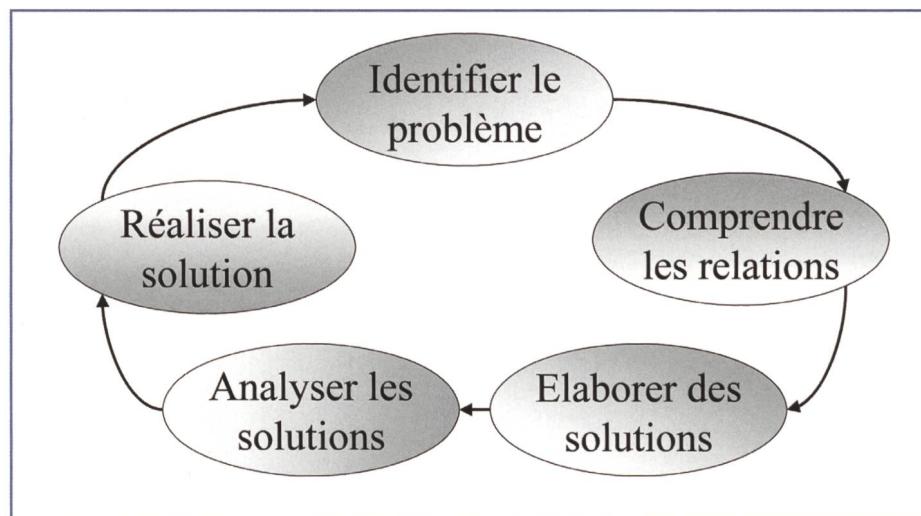


Figure 1. Les cinq étapes de la méthode de Probst et Gomez.

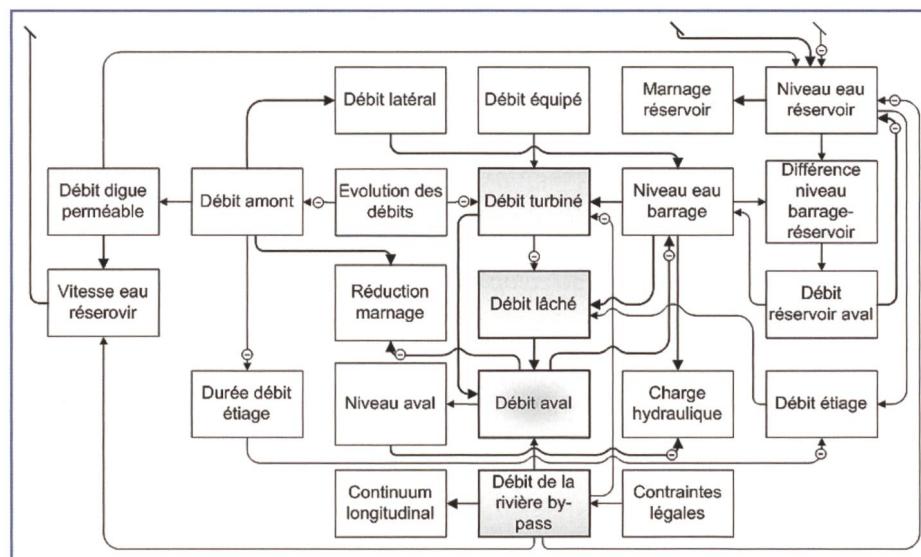


Figure 2. Diagramme d'influence; exemple du réseau hydraulique partiel; le débit de la rivière by-pass, le débit turbiné et le débit lâché influencent directement le débit aval.

situation qui engendre, probablement de nouveaux problèmes.

Les frontières du problème sont définies au travers des partenaires et de leurs attentes vis-à-vis du projet. La compréhension du fonctionnement du système à travers les acteurs mène naturellement à la définition des variables du projet.

Ces variables sont intégrées au sein d'un réseau unique qui forme le diagramme d'influence. Les relations entre les variables sont modélisées par trois aspects: la direction, le degré d'influence et l'effet temporel. La direction de l'influence indique si la relation est proportionnelle ou inversement proportionnelle à la cause. L'intensité distingue, sur une échelle arbitraire, si l'influence est faible, moyenne ou forte. L'effet temporel donne une indication sur le temps nécessaire à la propagation de l'influence. Mathématiquement, une influence est l'expression de la dérivée partielle entre deux facteurs

successifs. Comme montré à la Figure 2 l'influence entre le débit aval et le débit lâché aux vannes (facteur B) est exprimé par l'équation suivante:

$$f = \frac{\partial F(A, B, C)}{\partial B}$$

où le facteur A représente le débit turbiné, le facteur C le débit de la rivière by-pass (rivière de contournement de l'ouvrage pour assurer la migration des poissons et le continuum écologique), F la relation mathématique qui lie ces quatre facteurs et f la dérivée partielle. Le diagramme d'influence donne ainsi un modèle relatif complexe de la réalité à partir d'information qualitative (Sterman, 2000).

L'analyse mathématique du diagramme conduit au graphe d'influence. Ce dernier synthétise toute l'information (Figure 3). L'abscisse représente la capacité active des variables (leur capacité à influencer les autres variables) et l'ordonnée

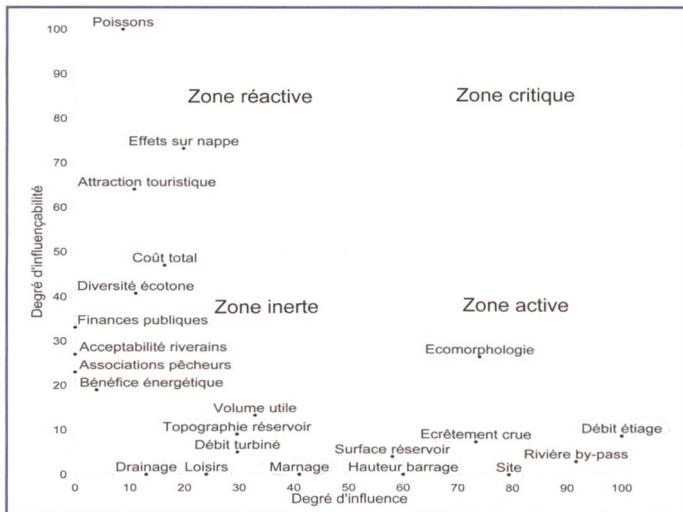


Figure 3. Répartition graphique des quatre zones; représentation des variables de taille, de gestion et d'objectif les plus importantes.

leur capacité réactive (leur capacité à être influencé par les autres variables). Le graphe est divisé en quatre parties. La zone inerte contient les variables de moindre importance. La zone active contient les leviers du système. La zone réactive contient les indicateurs préférés. La zone critique contient les variables critiques. Leur activité jointe à leur réactivité nécessite une attention spéciale. Elles peuvent en effet générer des réactions en chaîne.

2.2 Application au Rhône

Pour l'application du projet hydroélectrique à buts multiples sur le Rhône, les acteurs du système sont répartis en six classes d'activité. La première classe considère les acteurs politiques. Ceux-ci sont divisés en trois groupes (fédérale, cantonale, communale). La seconde classe énumère les acteurs économiques. Ils se répartissent sur sept niveaux: agriculture, construction, producteurs d'hydroélectricité, artisanat, finance, tourisme et immobilier. Cette énumération suit la logique établie des

secteurs primaire, secondaire et tertiaire de l'économie. La troisième classe considère les acteurs sociaux du projet. Ils sont divisés sur quatre niveaux: riverains du projet, contribuables, demandeurs d'emploi et consommateurs de loisirs. La même personne physique peut ainsi être vue sous différents angles. La quatrième classe recense les acteurs liés à l'écologie. Elle distingue les associations avec droit des associations sans droit de recours au niveau fédéral. Devant la diversité des associations à la poursuite de buts similaires, une logique thématique est également mise en œuvre. Les deux dernières classes, d'une importance moindre, sont constituées des instituts de recherche et des médias. Cette étude regroupe 125 types d'acteurs avec environ 320 attentes relatives au projet.

A partir des acteurs et de leurs attentes, 153 variables sont définies. Elles sont réparties, selon leur signification physique, dans six thèmes: hydraulique, énergie, finance, socio-économie, nappe phréatique et écologie.

Le diagramme d'influence du système est construit avec ces 153 variables. Une analyse de sensibilité sur l'interprétation des résultats permet de relativiser l'impact subjectif de la méthode. Elle porte principalement sur le choix de l'intensité des relations et sur la manière d'agréger les influences indirectes. Cette analyse montre que la variation relative des variables entre elles reste inférieure à 10 %. L'impact subjectif de la méthode conditionne donc les résultats dans cette même mesure. Cette variation doit ainsi être prise en compte dans l'analyse des résultats. Elle reste toutefois faible.

Les résultats de l'analyse quantitative distinguent trois types de variables. Les variables de taille (rectangle sur le graphe) constituent le premier groupe. Les caractéristiques du site, la rivière by-pass, la hauteur du barrage, la surface du réservoir et les adaptations écomorphologiques en sont les variables principales. L'écomorphologie est définie comme «les conditions structurelles des rivières qui comprennent la morphologie de la rivière, les constructions hydrauliques faite dans son périmètre et les conditions environnantes» (OFGEG, 1998). Le débit turbiné, la topographie du réservoir, les canaux de drainage, les infrastructures de loisirs et le volume utile du réservoir sont d'importance moindre. Les deux variables de gestion constituent le second groupe (ellipse). Ces deux variables, de type hydraulique, sont le soutien au débit d'étiage et le marnage artificiel aval. Toutes deux dépendent des variables de taille et de l'équation de continuité. Cette dépendance mathématique permet une analyse quantitative. Cette dernière est rendue nécessaire pour produire une solution qui reste dans le domaine physique.

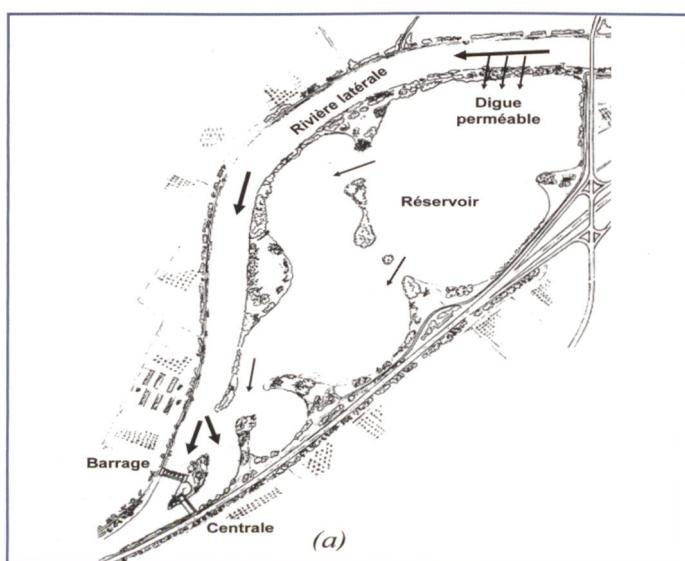
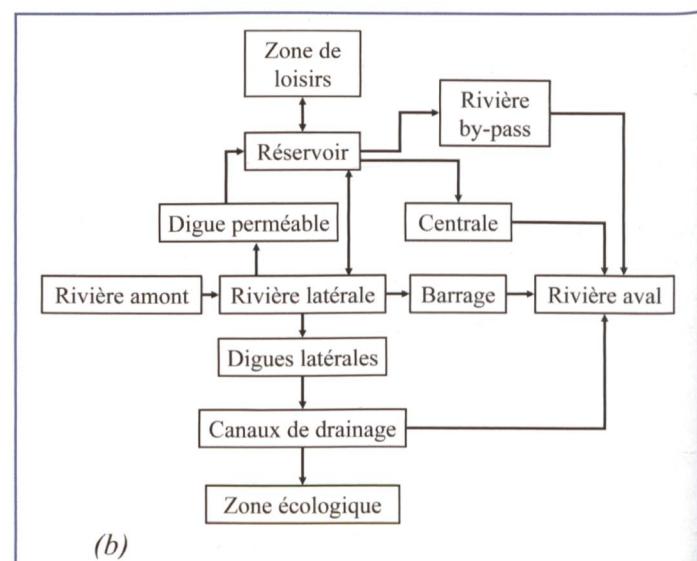


Figure 4. Configuration d'un projet à buts multiples; (a) in situ; (b) conceptuel.



Les variables «objectif» constituent le troisième groupe (trait tillé). Elles se divisent en deux parties. La première est relative aux aspects monétaires. Ces variables sont l'attraction touristique, le coût total et son effet sur les finances publiques, les bénéfices tirés d'un tel projet (vente d'énergie et protection en cas de crue). La seconde partie est relative aux aspects non-monétaires. Ces variables sont la diversité de l'écotone, le développement des poissons, les effets sur la nappe phréatique, la réduction des effets du marnage artificiel, la satisfaction des associations de pêcheurs et l'acceptabilité par les riverains.

L'étude qualitative souligne également l'impact des variables de configuration. Ces variables sont implicitement contenues dans le diagramme d'influence. Avec la configuration choisie, un tel projet à buts multiples sur le Rhône est représenté à la *Figure 4a* (Bollaert & al., 2000). Le même projet est représenté conceptuellement à la *Figure 4b* pour les aspects hydrauliques.

L'analyse qualitative montre finalement la nécessité d'une étude quantitative. Cette première analyse permet d'appréhender le fonctionnement du système et d'en comprendre les relations complexes qui le lient à son environnement. La seconde partie doit quantifier plus finement les aspects relatifs à la taille et à la gestion d'un tel aménagement.

3. Modèle numérique de simulation pour le réservoir

Le modèle de simulation du réservoir est développé de manière paramétrique. Il inclut des débits entrant horaires, des prix horaires d'énergie, une courbe de tarage de la rivière aval et une relation hauteur-volume du réservoir. Les débits de deux semaines représentatives du Rhône sont simulés. La première semaine représente une situation hivernale avec de fortes variations issues de la production hydroélectrique des grands ouvrages d'accumulation. La seconde semaine représente une situation estivale avec des variations de débits réduites et un débit moyen plus élevé. Le modèle détermine les débits horaires sortant du réservoir.

La réduction du marnage artificiel aval est un des buts principaux du réservoir. Le marnage aval est défini de manière paramétrique par son amplitude maximale (variation maximale du plan d'eau de la rivière aval en cm) et par son gradient (variation maximale du plan d'eau entre deux heures successives en cm/h). Une

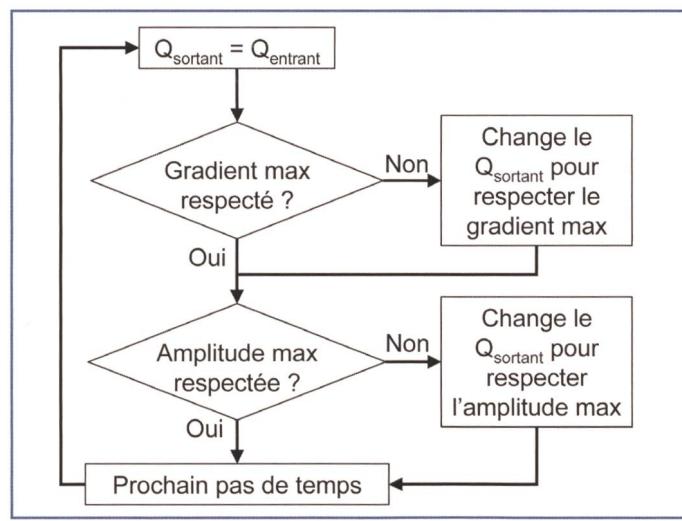


Figure 5.
Algorithme a priori.

amplitude de 30 cm et un gradient de 8 cm/h sont admis par la littérature comme des valeurs raisonnables (Halleraker & al., 2003). La production d'énergie, la création de biotopes et de zone de loisirs sont des buts additionnels du réservoir.

Sur le Rhône, ce modèle est appliqué à un réservoir de 1 km² généré par un barrage de 8,6 m. Le volume hebdomadaire hivernal du Rhône s'élève à 65 mio m³. Le volume estival vaut 180 mio m³. Les débits horaires sont mesurés à Branson de même que la courbe de tarage du Rhône (station OFEG). A cet endroit le Rhône contient déjà la majeure partie de son débit. La pente de 1‰ est également représentative d'une grande partie du Rhône valaisan.

La régulation du réservoir est effectuée par deux approches. La première ignore la prévision des débits et calcule les débits sortants par des heuristiques (gestion a priori). La seconde admet une prévision hebdomadaire parfaite et définit les débits sortants par une optimisation non-linéaire (gestion a posteriori).

3.1 Gestion a priori du réservoir

Trois heuristiques sont développées. Elles prennent en compte seulement le débit entrant actuel et celui du pas de temps précédent. Elles calculent ensuite avec les contraintes de gestion imposées le débit sortant.

Deux cas extrêmes de gestion peuvent être mis en évidence:

- Le réservoir assure un débit sortant constant.
- Le réservoir garde un niveau constant. Le débit sortant est donc équivalent au débit entrant.

Dans le premier cas, le réservoir concentre la totalité du marnage. La rivière aval souffre alors d'un débit artificiellement constant. Le volume du ré-

servoir nécessaire pour cette gestion est extrême. Son utilisation à d'autres fins est rendue impossible par les grandes variations qu'il subit.

Dans le second cas, la rivière aval garde la totalité du marnage. La production d'énergie de l'aménagement est maximisée mais le réservoir ne remplit plus son rôle principal. Ce cas est pris comme référence (100%) pour la production énergétique des autres gestions.

La troisième heuristique représente une gestion intermédiaire. Elle est définie par les règles suivantes (*Figure 5*):

- Commence avec un débit sortant égal au débit entrant.
- Si le gradient, par rapport au débit sortant du pas de temps précédent, n'est pas respecté, modifie le débit sortant.
- Si l'amplitude est dépassée, réduit le débit sortant à la valeur maximale acceptable.
- Continue avec le prochain pas de temps.

Ces règles violent légèrement le principe d'a priori. En effet, cette heuristique requiert une estimation du volume hebdomadaire pour fixer le niveau moyen dans la rivière aval. L'amplitude détermine ensuite les seuils minimal et maximal à respecter. La *Figure 6* montre la régulation d'une semaine hivernale sévère avec cette gestion. La production d'énergie correspond à 65% du maximum.

La *Figure 7* montre la même régulation pour une semaine estivale. La production d'énergie augmente alors à 87% du maximum.

3.2 Gestion a posteriori du réservoir

La prise en compte de la prévision des débits permet de réduire simultanément le marnage aval et les fluctuations du réservoir. La prévision des débits rend la résolu-

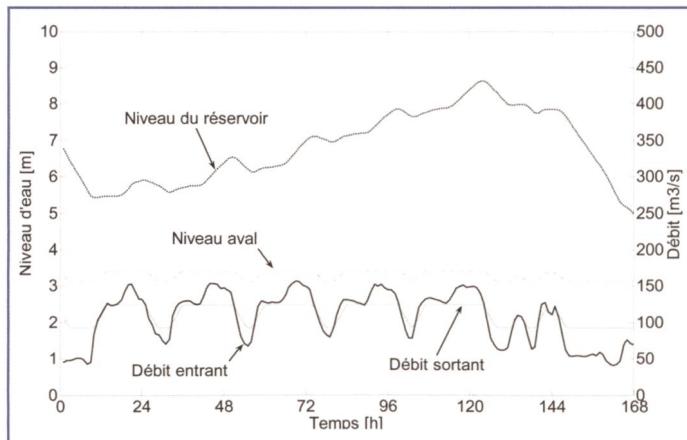


Figure 6. Régulation hebdomadaire hivernale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation *a priori*.

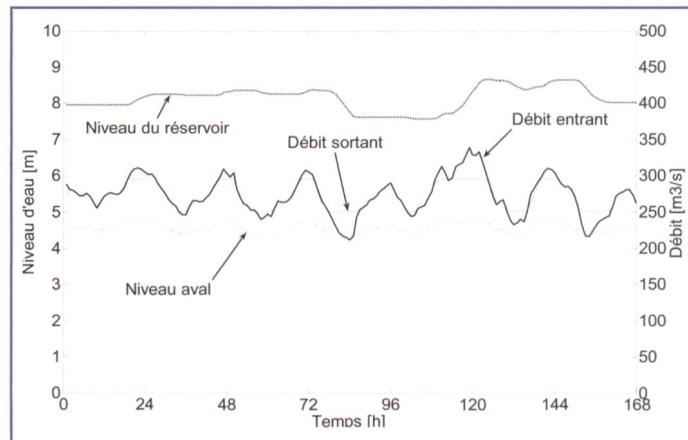


Figure 7. Régulation hebdomadaire estivale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation *a priori*.

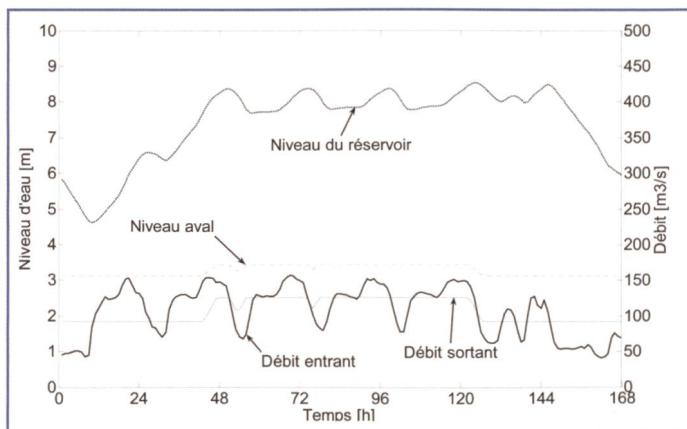


Figure 8. Régulation hebdomadaire hivernale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation *a posteriori*, troisième fonction.

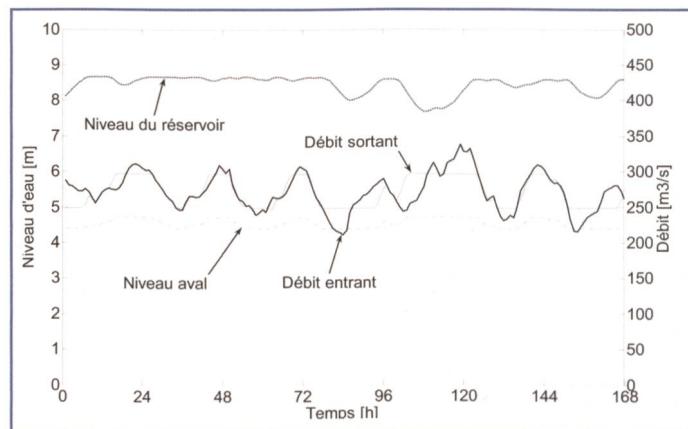


Figure 9. Régulation hebdomadaire estivale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation *a posteriori*, troisième fonction.

lution non-linéaire (Westphal & al., 2003). Le problème est résolu en programmation AMPL (Fourer & al., 2002). Les contraintes du système sont la réduction du marnage aval (amplitude et gradient maximaux) et les limites physiques du réservoir. Trois fonctions objectives sont définies:

- Minimisation du volume d'accumulation nécessaire.
- Minimisation des variations du niveau d'eau du réservoir autour de la valeur initiale.
- Maximisation du niveau d'eau dans le réservoir.

La première fonction objective montre une tendance hebdomadaire pour la régulation hivernale. Afin de garder le débit d'étiage aval en dessus de sa valeur limite, le réservoir accumule de l'eau pendant les cinq premiers jours de la semaine. La seconde fonction objective présente la même tendance mais le réservoir garde son niveau initial aussi longtemps que possible. La troisième fonction inverse la tendance. Le réservoir reste plein toute la semaine et se vide pendant le weekend. Le prochain jour ouvrable est ainsi exclu-

sivement utilisé pour remplir le réservoir. La maximisation du niveau de la dernière fonction objective maximise implicitement la production d'énergie. Pour une semaine hivernale, cette fonction génère une production d'énergie équivalente à 80% du maximum (Figure 8).

Pour une semaine estivale, la même fonction conduit à une production d'énergie de 95% du maximum (Figure 9).

Pour la semaine hivernale, la réduction du gradient à 4 cm/h est possible sans perte d'énergie (réduction inférieure à 0,5%). Une telle régulation génère un hydrogramme plus proche d'un hydrogramme historique (Meile & al., 2005). Pour les mêmes raisons, les contraintes de marnage aval pour l'été peuvent être relaxée jusqu'à une amplitude de 42 cm et un gradient de 10 cm/h. Avec ces changements, le niveau d'eau dans le réservoir est sensiblement stabilisé et la production d'énergie est légèrement améliorée (+3%). La variation des contraintes de gestion permet de produire la courbe des solutions non-dominées (solutions de Pareto) entre le marnage aval et les fluc-

tuations du réservoir. Une représentation conceptuelle des différentes courbes de Pareto selon le degré de prévision est donnée à la Figure 10.

4. Perspectives

Cette première analyse montre la compatibilité entre deux objectifs habituellement antagonistes, à savoir la production d'énergie et la diminution du marnage. Pour être consolidée, cette analyse doit considérer des séries annuelles entières. Avec ces dernières, des indicateurs statistiquement représentatifs peuvent être calculés. Une comparaison avec le régime historique peut ensuite être effectuée. L'amélioration quantitative obtenue par la retenue peut ainsi être calculée. Pour les situations de crue, l'analyse hydraulique doit également quantifier le laminage possible de la pointe.

Une deuxième analyse sur le fonctionnement thermique de la retenue permet de quantifier l'impact thermique de la retenue sur la rivière aval. Il est probable que cet effet soit négligeable. Cette ana-

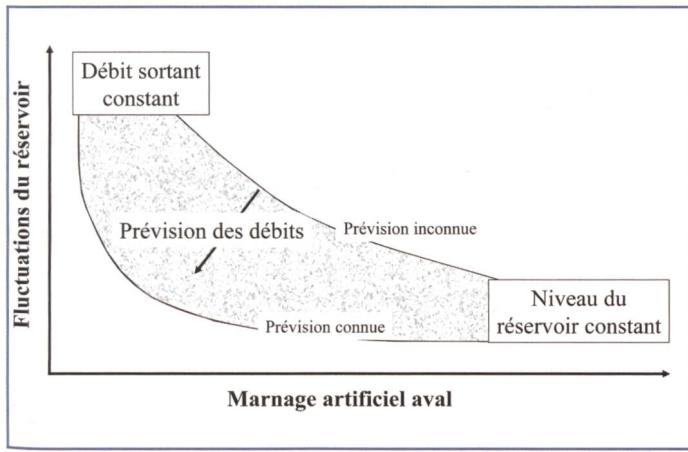


Figure 10. Courbes conceptuelles des solutions de Pareto selon le degré de prévision.

lyse doit également permettre de prédire la température de l'eau dans la retenue et de mesurer les risques liés à la formation de brouillard par évaporation.

Une troisième analyse économique est nécessaire pour fixer les limites de faisabilité d'un tel aménagement. Elle doit également permettre de déterminer une clé acceptable de répartition des coûts.

Une quatrième analyse écologique du système est actuellement en cours. Cette analyse peut être considérée comme un ensemble d'indicateurs qui déterminent, à partir des paramètres hydrauliques, le résultat écologique probable des différents modules étudiés (retenue, rivière by-pass, rivière aval).

Finalement l'intégration de l'ensemble des outils de simulation au sein d'un algorithme d'optimisation doit permettre de dégager l'ensemble des solutions non-dominées.

5. Conclusions

L'analyse quantitative holistique de réflexion en réseau distingue et relativise les variables de taille, de gestion et d'objectif du projet. Elle souligne aussi les variables de configurations qui sont implicitement contenues dans le diagramme d'influence. Les modélisations suivantes doivent autant que possible rendre explicite ces variables. Par ailleurs les résultats qualitatifs ont montré la nécessité d'une simulation quantitative pour les aspects de gestion notamment.

L'analyse quantitative propose des gestions possibles du réservoir. La prise en compte des prévisions et les techniques de programmation non-linéaire permettent d'optimiser cette gestion. La variation des contraintes de gestion (marnage artificiel aval défini par son amplitude et son gradient) produit la courbe des solutions non-dominées entre le marnage aval et les fluctuations du réservoir. Ces solutions sont directement utiles comme

alternatives proposées aux décideurs. Par itération successive, le même modèle est également capable d'optimiser les variables de taille d'un tel aménagement.

La régulation du réservoir par maximisation de son niveau d'eau (troisième fonction objective) agit directement sur l'état écologique de la rivière aval et sur le réservoir. Sa production d'énergie et son utilisation à des fins de loisirs sont également améliorées avec sa stabilité. Ainsi une gestion optimisée permet de réconcilier des buts apparemment antagonistes. Plus spécifiquement au Rhône valaisan, il semble qu'un aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples soient une solution adaptée pour réduire les effets négatifs du marnage issus des grands aménagements à accumulation.

Bibliographie

- Bollaert, E., Irniger, P. and Schleiss, A. (2000). Management of sedimentation in a multipurpose reservoir in a run-of-river powerplant project on an alpine river. Proc. of conf. Hydro 2000, Bern, Switzerland, pp. 183–192.
- Cai, X., Lasdon, L. and Michelsen, A.M. (2004). Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis. J. Water Resour. Plng. Mgmt., Vol. 130 (1), pp. 4–14.
- Coyle, G. (2000). Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. System Dynamics Review (16), pp. 225–244.
- EuroDicauTom, A Glossary of Space Terms, ESA 1982, <http://europa.eu.int/europadicautom/Controller>.
- Flug, M., Seitz, H. and Scott, J.F. (2000). Multi-criteria Decision Analysis Applied to Glen Canyon Dam. J. Water Resour. Plng. Mgmt., Vol. 126 (5), pp. 270–276.
- Fourer, R., Gay, D. M. and Kernighan, B. W. (2002). AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming. Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company.
- Gomez, P. and Probst, G. (1995). Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens. Paul Haupt Verlag, Bern, Switzerland.
- Halleraker, J. H., Saltveit, S. J., Harby, A., Arnekleiv, J. V., Fjeldstad, H.-P. and Kohler, B. (2003). Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. River Res. Applic., vol. 19, pp. 589–603.
- Leach, W. D. and Pelkey, N. W. (2001). Making Watershed Partnerships Work: A Review of the Empirical Literature. J. Water Resour. Plng. Mgmt., Vol. 127 (6), pp. 378–385.
- Meile, T., Schleiss, A. and Boillat, J.-L. (2005). Entwicklung des Ablussregimes der Rhône seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône, Communication n° 21, 9 juin, Martigny.
- OFEG (1998). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse, Ecomorphologie – niveau R (région). Information concernant la protection des eaux, n° 27, Office fédéral des Eaux et de la Géologie, pp. 1–49.
- Sterman, J. (2000). Business Dynamics: System thinking and modeling for a complex world. McGraw-Hill, New York.
- United Nations Office of Technical Cooperation (1972). Water Resource Project Planning. Water Resources Series, n° 41, United Nations, New York, pp. 132–147.
- Westphal, K. S., Vogel, R. M., Kirshen, P. and Chapra, S. C. (2003). Decision Support System for Adaptive Water Supply Management. J. Water Resour. Plng. Mgmt., Vol. 129 (3), pp. 165–177.

Remerciements

Ce travail de recherche est supporté financièrement par la Commission suisse pour la Technologie et l'Innovation (CTI, projet n° 6794.1 FHS – IW), en partenariat avec les Forces Motrices Valaisannes (FMV), le Service des Forces Hydrauliques du Valais (SFH – VS) et l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG, projet Rhône – Thur). Le Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes ainsi que les bureaux d'ingénierie Stucky et VA Tech apportent leur soutien respectif pour les domaines écologique et technique.

Adresse de l'auteur

Philippe Heller

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Bât. GC, station 18

CH-1015 Lausanne

+41-21-693 23 85

<http://lchwww.epfl.ch>

philippe.heller@epfl.ch

Objectifs Environnementaux et Paysagers d'un Aménagement Hydraulique au fil de l'eau

- Marc Pellaud, Thierry De Pourtalès, Ion Iorgulescu, Rodolphe Schlaepfer

Wasserkraft
Wasserkräftanlagen alle

Résumé

Les aménagements hydrauliques ont causé une profonde modification de la majeure partie des hydrosystèmes fluviaux au niveau global. Le projet de recherche Synergie vise le développement de conceptions innovatrices et de méthodologies scientifiques pour l'évaluation des synergies possibles pour des aménagements hydrauliques à buts multiples. Le volet écologique du projet est sous la responsabilité du Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (EPFL-GECOS). Les différents aspects de l'étude et de l'implémentation du projet dans le cadre d'une rivière déjà fortement régulée sont exposés et l'utilisation de façon pratique des connaissances et techniques scientifiques à disposition pour la résolution de problèmes environnementaux complexes est mise en avant. Après un bref rappel des altérations causées aux rivières et à leurs plaines alluviales par l'homme, ainsi que des objectifs écologiques du projet Synergie, un modèle conceptuel spatial d'un tel aménagement est présenté. Il est suivi par un bref aperçu de l'approche et des méthodes suivies pour le développement du modèle ainsi que pour l'intégration synergétique aux différentes échelles. La perspective étant véritablement la création d'un outil relativement simple reposant sur des bases scientifiques solides qui soit utilisable lors des étapes de prises de décision lors de la conception et la gestion d'un tel projet.

Dynesius, 1994; Bornette, Amoros et al., 1998) mais également sur la recharge de l'aquifère (Tockner and Ward, 1999). Les restitutions induisent également un phénomène de marnage ou éclusées qui engendrent parfois plusieurs fois par jour des variations de profondeur et de vitesse de courant soudaines et importantes favorisant le colmatage du lit et susceptibles de restreindre la connectivité verticale entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Valentin, 1995; Céréghino and Lavandier, 1998; Parasiewicz, Schmutz et al., 1998; Frutiger, 2004). Cette connectivité verticale joue un rôle essentiel au sein de l'hydrosystème (Amoros and Petts, 1993; Ward, Malard et al. 1999; Malard, Tockner et al., 2002; Malard, Galassi et al., 2003).

Les conditions physico-chimiques de l'eau peuvent également se trouver modifiées. Lors de la création d'un réservoir au fil de l'eau, le milieu lotique caractéristique des cours d'eau s'estompe peu à peu et laisse place à un milieu de type lentique, défavorable aux organismes d'eau

1. Introduction

Au cours du temps, divers aménagements ont eu de fortes répercussions sur les cours d'eau en Suisse (ex: qualité des biotopes pour la faune et la flore, éléments du paysage) ainsi que sur leurs fonctions utilitaires. Du XVII^e au XIX^e siècle, les défrichements et l'exploitation des forêts en montagne ont entraîné une augmentation de la violence des crues, du transport des sédiments et des inondations sur le plateau. De nombreuses corrections ont donc été effectuées principalement dans la deuxième moitié du XIX^e siècle (rectifications du cours, abaissements du lit). L'utilisation accrue de l'énergie hydraulique au XX^e siècle a donné naissance à des tronçons à débits résiduels et à retenues et modifié le régime d'écoulement et de charriage de bassins hydrologiques entiers (OFEFP, 1998; OFEFP, 1998). L'exploitation d'ouvrages hydroélectriques entraîne divers effets sur l'écologie des hydrosystèmes. L'altération du régime hydrologique naturel (contrôle des débits, restitutions d'eau, dérivations...) entraîne une myriade d'effets le plus souvent négatifs sur les hydrosystèmes. On note généralement une baisse de la connectivité latérale (Amoros and Petts, 1993; Richter

and Richter, 2000; Silk and Ciruna, 2004) ayant des conséquences négatives sur la disponibilité en ressources trophiques et spatiales pour la faune et la flore typiquement associées aux hydrosystèmes (Nilsson, Ekblad et al., 1991; Nilsson and

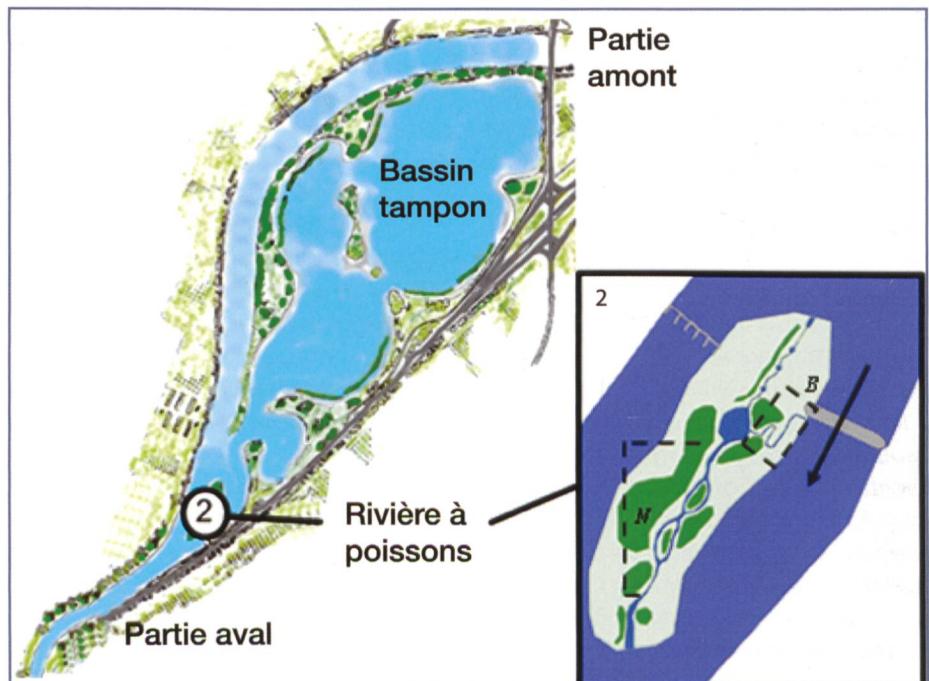


Figure 1. Représentation schématique des éléments écologiques du projet Synergie (2N – composante «naturelle» de la rivière à poissons, 2B – passe à bassins).

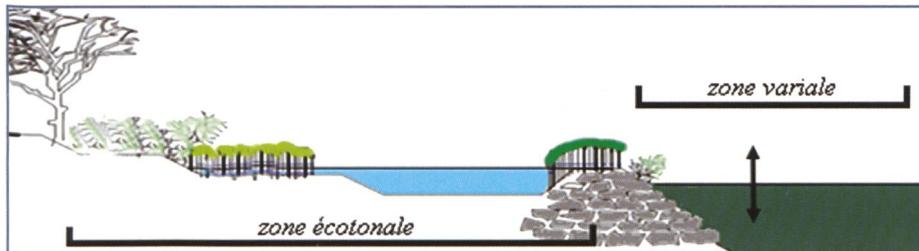


Figure 2. Coupe transversale d'un «ourlet» écologique pour le bassin tampon. La zone écotone est élargie et reste constamment en eau, alors que la zone variale est réduite et subit pleinement les variations de niveau induites par les restitutions.

courante (Silk and Ciruna, 2004). Une eau prélevée dans la couche épilimnétique d'un réservoir risque d'élèver la température de la rivière, causant un accroissement local du métabolisme pouvant affecter la croissance et altérer la période d'éclosion de certains organismes (e.g. éphémères). Cette altération thermique peut à terme modifier le cortège taxonomique du zoobenthos. De même, une eau prélevée dans la couche hypolimnétique d'un réservoir peut causer un refroidissement local du cours d'eau, ayant pour effet une diminution du métabolisme pouvant entraîner des altérations dans le cycle de vie de certains organismes (Poff, Allan et al., 1997; Frutiger, 2004).

Les barrages forment une barrière physique au continuum amont-aval et peuvent altérer le passage longitudinal des sédiments (Loizeau and Dominik, 2000), du matériel végétal grossier (Silk and Ciruna, 2004), de la matière organique fine, des nutriments et du mouvement des organismes (Amoros et Petts, 1993).

L'altération du régime hydrologique est également issue de la canalisation, qui entraîne des modifications dans l'intensité et la durée des inondations, ainsi qu'une diminution des échanges avec l'aquifère et peut en outre favoriser la prolifération d'espèces invasives (Poff, Allan et al., 1997). L'habitat physique à l'écotone est bien souvent considérablement réduit avec l'altération du lit et des berges (enrochements), et une homogénéisation des tronçons (naturellement hétérogènes) conduit à un système uniforme simplifié, où la diversité de l'habitat se trouve réduite. Dans ces milieux monotones, les espèces spécialistes cèdent la place aux espèces généralistes (Valentin, 1995; Poff, Allan et al., 1997). Les amphibiens, oiseaux, reptiles et mammifères souffrent également des effets de la canalisation.

Malgré le fait que ces remarques ne s'appliquent pas toutes aux hydro systèmes suisses, nos rivières ne sont pas épargnées puisqu'il est considéré que seul 10% des cours d'eau se trouvent en

core dans un état naturel ou semi naturel (OFEFP, 1998; OFEFP, 1998). En effet près de 60% de la consommation d'électricité du pays est couverte par l'hydraulique et le potentiel technique est exploité à 80% (Schleiss, 2000). Il est donc actuellement devenu indispensable et par ailleurs rendu obligatoire d'avoir une vision holistique des aménagements hydrauliques intégrant ces aspects.

L'objectif de cet article est d'introduire l'aspect environnemental du projet Synergie (Heller, 2005; Meile, Schleiss et al., 2005; Schleiss, 2005) qui devrait – à travers la modélisation – proposer la prise en compte et l'optimisation des aspects écologiques dès la phase de conception d'un aménagement hydroélectrique. Le projet Synergie est mené par une équipe multidisciplinaire dirigée par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH-EPFL). Cette équipe est composée du Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (GECOS-EPFL), du Laboratoire de Paysage et Architecture (PARC) et de partenaires privés (Stucky SA et VA Tech Hydro SA). Les objectifs scientifiques sont le transfert vers la pratique des bases scientifiques et méthodologiques pour l'intégration de la réflexion écosystémique et écologique dans les aménagements hydroélectriques au fil de l'eau. La connaissance des interactions entre les aménagements, de leur gestion prévue avec les écosystèmes et les paysages concernés doit nous permettre l'élaboration d'outils simples permettant l'appréhension des impacts de la conception d'un aménagement d'un cours d'eau sur les paramètres et processus écologiques. Ceci afin d'identifier et de promouvoir les synergies entre les objectifs socio-économiques, sécuritaires et écologiques dès la phase de conception.

Les objectifs environnementaux lors de l'aménagement d'une rivière fortement régulée dans le cadre du projet Synergie seront exposés. Le modèle «écologique» conceptuel spatial et relationnel sera exposé et l'utilisation des systèmes

fous dans la modélisation «écologique» fonctionnelle d'un tel système sera introduite. La problématique des considérations à prendre pour l'intégration visuelle d'un tel projet dans un paysage donné sera également abordée et l'article s'achèvera sur les perspectives et le travail à venir au sein de Synergie.

2. Objectifs environnementaux du projet Synergie

L'objectif du volet «écologie» de Synergie est d'expliquer les principes scientifiques de base et les méthodes d'analyse écologique disponibles permettant de réaliser une meilleure synergie entre les objectifs écologiques et les autres, notamment la production d'énergie hydroélectrique. Les différentes étapes concernant les objectifs environnementaux sont:

1. l'établissement d'un état des connaissances des impacts environnementaux des aménagements hydroélectriques au fil de l'eau sur les écosystèmes et les paysages;
2. la contribution à l'identification et la validation des paramètres environnementaux et de leur relation avec les autres paramètres (paramètres «non-écologiques») identifiés par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (paramètres hydrauliques, économiques, sociaux, etc.);
3. l'analyse des caractéristiques et du fonctionnement de quelques écosystèmes types tels que prévus par les nouvelles conceptions développées par les bureaux Stucky SA et VA Tech SA;
4. l'analyse du système paysager à l'échelle du secteur fonctionnel sensu Amoros (1993) et au niveau paysager dans l'état avant et après aménagement (cf. point 5);
5. l'étude de la dynamique au niveau paysager, notamment, de l'état de référence;
6. la validation des modèles pour les paramètres écologiques/environnementaux ainsi que pour les relations entre ces derniers et les paramètres caractérisant le projet;
7. l'élaboration d'un système de suivi et de contrôle des impacts réels des aménagements en vue d'adaptation de la gestion et de la maintenance.

L'analyse du système paysager à l'échelle du secteur fonctionnel est présentée en fin d'article (point 5) de manière à séparer les considérations «écologie fonctionnelle» des considérations «perception humaine du paysage».

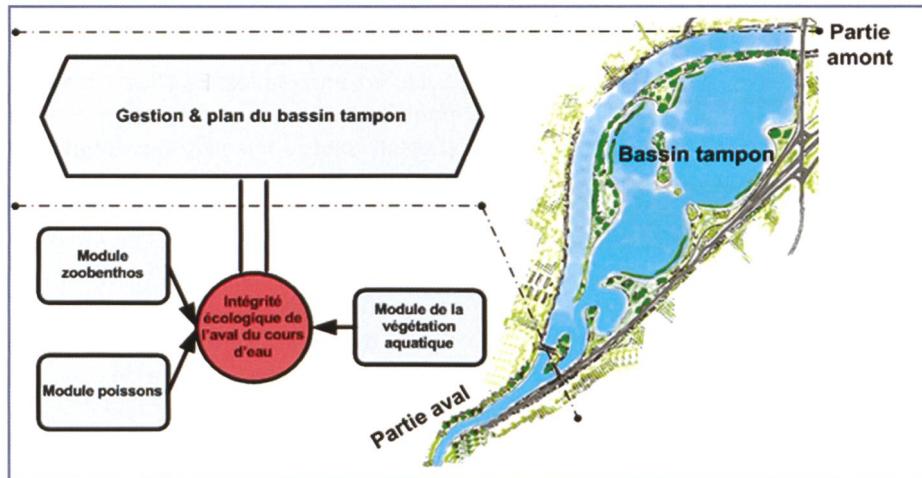


Figure 3. Schéma conceptuel de la modélisation du système pour la détermination de l'intégration écologique du projet.

3. Représentation du modèle écologique - niveau conceptuel

Une approche systémique c'est révélée être la plus rigoureuse dans l'étude conceptuelle du projet. En effet, le besoin de modularité du système lié à la quantité des paramètres, processus et sous-systèmes en jeux a mené à une schématisation complexe du système. Cette approche s'est également prouvée favorable pour l'approche interdisciplinaire et la communication entre les partenaires du projet.

3.1 Représentation spatiale du projet

Le volet environnemental du projet Synergie se situe dans le contexte d'un hydro-système fluvial (Amoros et Petts, 1993) ayant un cours d'eau principal fortement canalisé et qui subit de fortes perturbations dues aux restitutions des eaux turbinées pour la production électrique (marnage/éclusée). Notre secteur comporte quatre éléments connectés:

- l'écosystème amont – se secteur correspond au point d'entrée du système ou à l'état avant l'aménagement. Cette partie risque de subir une légère influence de la courbe de remous (influence théorique sur plusieurs kilomètres mais de manière pratique correspond à une légère baisse des vitesses de courant et augmentation de la profondeur).
- le bassin tampon – Le bassin sert de tampon aux restitutions brutales du turbinage et est donc soumis à des variations de niveaux pouvant être considérables. Dans le but d'amener une composante écologique à la vocation technique du bassin, il est nécessaire de pallier à l'ampleur de ces perturbations. La création d'un ourlet

écologique (Figure 2) est susceptible de contrer ces perturbations en offrant d'une part une certaine stabilité de la zone écotone (interface aquatique/terrestre), et d'autre part en l'élargissant considérablement. La zone écotone doit être calme et peu profonde (<0,5 m) et son niveau doit y rester relativement constant. Elle est alimentée lorsque la retenue est pleine et reste en eau lorsque le niveau est bas. Le développement des hélophytes y est favorisé, ce qui devrait permettre le développement de la faune typiquement associée aux zones humides.

- la rivière à poissons – elle est indispensable pour permettre le maintien du continuum amont – aval pour les invertébrés et les poissons. Les particularités écologiques de cette rivière sont (1) un tronçon naturel avec une succession de radiers et de moulles et des berges abritant hélophytes et buissons, (2) une passe à bassin permettant aux poissons se trouvant devant les turbines de poursuivre leur migration amont.
- le système écologique aval – dans le cas du volet «environnement» de Synergie est la cible principale du projet. Une atténuation du marnage ainsi que le passage de crues morphogènes doit augmenter de manière significative la qualité écologique de la partie aval du cours d'eau.

3.2 Schéma conceptuel de la modélisation du système pour la détermination de l'intégration écologique du projet

L'intégration écologique du projet s'effectue à deux niveaux. Le premier niveau comprend la mise en œuvre d'un

design et d'une gestion à la fois du bassin tampon et de la rivière à poissons, qui remplisse les tâches écologiques mentionnées en 3,1b et 3,1c. Cette première condition est assumée comme remplie avant de passer à la simulation menant à l'appréciation de l'intégration écologique du cours d'eau aval. L'ensemble des objectifs sont traduits dans l'hydrogramme sortant du bassin de rétention par les modèles hydrauliques et sociaux. Le procédé d'agrégation menant à la détermination de l'intégrité écologique du système dépendra directement des objectifs fixés. A chaque action sur le design ou la gestion de l'ouvrage suivra une conséquence écologique. Répété de manière itérative, ce procédé doit permettre (1) une optimisation de la planification et du mode de gestion de l'ouvrage adaptée aux objectifs fixés et (2) un enseignement théorique sur l'évolution probable de la partie aval.

4. Travaux en cours – modélisation fonctionnelle du système

4.1 Module du zoobenthos – méthode

La méthode suivie pour le développement d'un modèle de prédiction du zoobenthos est une méthode hybride entre réseaux neurologiques artificiels (RNA) et logique floue (FL). Le fonctionnement, l'utilisation et l'application des RNA en écologie est fréquente (Dowla and Rogers, 1995; Lek and Guégan, 1999; Obach, Wagner et al., 2001) et peut-être aisément combinée avec la logique floue (Zadeh, 1965; Zimmermann, 1985; Zadeh, 1995; Silvert, 1997; Silvert 2000; Enea and Salemi, 2001; Adriaenssens, DeBaets et al., 2004; McKone and Deshpande, 2005).

Dans un premier temps, un Indice de Richesse Prédictive Non-Ajusté à l'effet du marnage (IRPNA) a été modélisé à l'aide des RNA (The MathWorks, 2005). Cet indice nécessite les entrées de relevés taxonomiques ponctuels associés aux conditions hydrogéomorphologiques au moment et au lieu d'échantillonnage (vitesse du courant, profondeur, distribution granulométrique).

L'effet du marnage sur le zoobenthos est traduit à l'aide d'un coefficient flou qui vient ajuster l'IRPNA et nous donne une richesse prédictive par tronçon homogène.

Le modèle (Figure 4) est ensuite testé avec des données-scénario (un hydrogramme) et une richesse prédictive du zoobenthos pour le tronçon est calculée.

4.2 Module poissons – méthode

Le modèle poissons prédit les résultats d'un modèle des microhabitats (Bovee, 1982; Ginot, 1998) pour quatre guildes d'habitat de poissons (Lamouroux and Souchon, 2002). Il est également ajusté par un coefficient flou combinant les effets du marnage et de la température de l'eau sur les guildes d'habitat de poissons (Valentin, 1995). On obtient ainsi des indices de convenance d'habitat pour chaque guilde, que l'on peut multiplier par des surfaces de tronçon-type de manière à obtenir des surfaces pondérées utiles par guilde. Une agrégation des valeurs par tronçons est alors effectuée indiquant une surface utile en ha par guilde ou encore un pourcentage de surface utile normalisé par guilde.

4.3 Module végétation aquatique – méthode

Ce module est toujours en cours d'implémentation. Il comporte trois parties, (1) prédiction de la biomasse des épiphytes sur un tronçon donné, (2) prédiction de la biomasse des hydrophytes sur un tronçon donné et (3) détermination d'un indice de potentiel de développement des hélophytes sur la zone écotone par tronçon homogène. La méthodologie proposée est inspirée de Wade et al. en ce qui concerne la prédiction de la biomasse des épiphytes et hydrophytes (Wade, Hornberger et al., 2001; Wade, Whitehead et al. 2002). La détermination de l'indice de développement des hélophytes dépend principalement des concentrations de Phosphore Réactif Soluble, de la température de l'eau, de la pente des berges et du marnage.

4.4 Procédé d'agrégation – méthode

Les modules zoobenthos et végétation aquatique participeront de manière directe à la note d'évaluation de l'intégrité du cours d'eau. Les poissons sont intuitivement de bons intégrateurs de l'état écologique d'un cours d'eau (sommet de

la chaîne trophique) et il est relativement aisés de les mettre en relation avec les objectifs écologiques d'un cours d'eau. La méthode d'agrégation indiquant l'intégration écologique du cours d'eau aval (Figure 5) propose donc de pondérer les guildes d'habitat de poisson en fonction de leur intérêt écologique.

4.5 Résultats attendus

A l'achèvement du projet, on peut s'attendre à un outil écologique modulaire, relativement simple à utiliser (support MATLAB), reposant sur des fondations scientifiques solides. L'objectif est la création d'un modèle écologique pouvant interagir avec d'autres systèmes (ex: hydraulique, financier, social,...) dans la recherche d'un algorithme d'optimisation multiobjectifs. C'est la pièce écologique d'un outil plus général servant à faciliter et conforter la prise de décision pour une élaboration optimale des variables de design et de gestion du complexe en fonction des critères définis par les autorités décisionnelles.

L'analyse du système paysager à l'échelle du secteur fonctionnel devra se faire dans le contexte du projet. La partie suivante traite de manière dissertative des principes généraux lors de l'analyse du système paysager à l'échelle du secteur fonctionnel.

5. Analyse du système paysager à l'échelle du secteur fonctionnel

Trois niveaux ou échelles d'interventions principales sont à prendre en compte pour permettre l'intégration d'un aménagement à buts multiples dans un paysage donné:

- l'intégration à l'échelle du grand paysage: la vallée
- l'intégration à l'échelle du secteur d'intervention: une ou deux communes
- l'intégration des installations et des contraintes techniques dans le site: la retenue.

Beaucoup d'autres éléments doi-

vent, également, être pris en compte et intégrés au processus du choix du site dès les premières études. En effet, les accès routiers et les parkings, les cheminements pédestres, cyclables ou équestres, les zones de loisirs et sportives (aquatiques et terrestres) ou éventuellement même les quelques installations techniques impératives à l'utilisation du site, tels que vestiaires, toilettes, restaurants, commerces, font partie du projet à intégrer, au même titre que les installations techniques hydrauliques du projet.

Il est dès lors impératif de recenser les éléments préexistants dans les sites potentiels afin d'intégrer dès le début du processus un maximum de contraintes liées à l'intégration du projet aux différentes échelles territoriales.

5.1 L'intégration à l'échelle du grand paysage: la vallée

Une étude préalable de la géographie générale de la vallée est nécessaire. Il est en effet indispensable d'en connaître l'évolution historique au niveau de l'hydrologie, de la topographie, de l'agriculture, des vergers, des forêts et de l'urbanisation durant les deux derniers siècles.

L'étude de la vallée actuelle permet de comprendre à l'échelle territoriale, les compartimentages de terrain, les milieux urbains et les secteurs agricoles et forestiers, les voies principales de circulation routière et ferroviaire, les cours d'eau naturels et canalisés, les surfaces d'eau existantes, ainsi que tous les éléments topographiques naturels ou artificiels présents. Cette recherche permet de faire un choix de secteurs qui permettraient d'intégrer de façon paysagère la plus optimale une retenue importante d'eau dans la vallée d'une part mais aussi, d'autre part, un programme s'y rattachant qui s'intègre et qui contribue au développement général de la vallée.

5.2 L'intégration à l'échelle du secteur d'intervention: une ou deux communes

L'étude du paysage à grande échelle a permis de déterminer des secteurs envisageables pouvant accueillir une retenue. A partir de ces sites sélectionnés, les calculs hydrauliques imposent un secteur général pour l'implantation du barrage, la hauteur des digues et la surface de la retenue. Il s'agit alors d'intégrer dans le paysage, le barrage en rivière avec la centrale hydroélectrique, les digues et la retenue. Il faut, dès lors, analyser précisément les impacts et les contraintes associées à l'implantation du barrage et à son fonctionnement.

Figure 4. Elaboration du modèle zoobenthos – technique hybride RNA/FL.

ment la topographie du lieu, les éléments de digues existants ou préexistants sous d'autres formes (routes, autoroute, voies de chemin de fer, collines, etc.) et rechercher une solution paysagère pour les intégrer ou les relier harmonieusement avec les nouvelles digues construites.

A priori, il n'est pas possible d'énumérer des conditions limites pour la construction de ces digues, ni en hauteur, ni dans leur aspect (rectiligne ou non, matériaux, couverture, etc.). Le travail d'intégration doit se faire pour chaque tronçon et ce sont les conditions environnementales qui dictent les conditions architecturales et paysagères.

On peut néanmoins énoncer les trois principes suivants:

- en général, minimiser la création de digues artificielles
- maximiser les digues à fonctions multiples (diversité d'utilités architecturales et paysagères)
- minimiser la création de digues à fonction unique

En parallèle de cette étude, il s'agit de relever et recenser précisément les infrastructures existantes dans le site (accessibilités piétonnes et cyclables, routes et parkings par exemple) les périmètres urbanisés ou à développer, les types de cultures sur les terres agricoles et les secteurs à protéger impérativement et ceux, à peut-être laisser en zones inondables.

Un recensement et une analyse des besoins des communes avoisinantes (touristiques, sportifs, loisirs, environnementaux, écologiques...) et des potentiels du secteur d'intervention permettent de tracer les lignes directrices d'un programme lié à la retenue hydraulique.

5.3 L'intégration des installations et des contraintes techniques dans le site: la retenue

Le choix programmatique et de type d'utilisation et d'utilisateurs du secteur de la retenue influence la réflexion sur la manière d'intégrer les différents éléments constituants la retenue.

Les éléments principaux sont le barrage, les digues, la surface d'eau et le marnage lié à l'installation hydroélectrique et les surfaces annexes liées soit à l'ouvrage hydroélectrique soit au programme «publique» venant se greffer sur cette retenue.

Le barrage est un élément ponctuel. Ses dimensions et son caractère «construit» nécessitent de le traiter avec beaucoup de soin. La dimension la plus

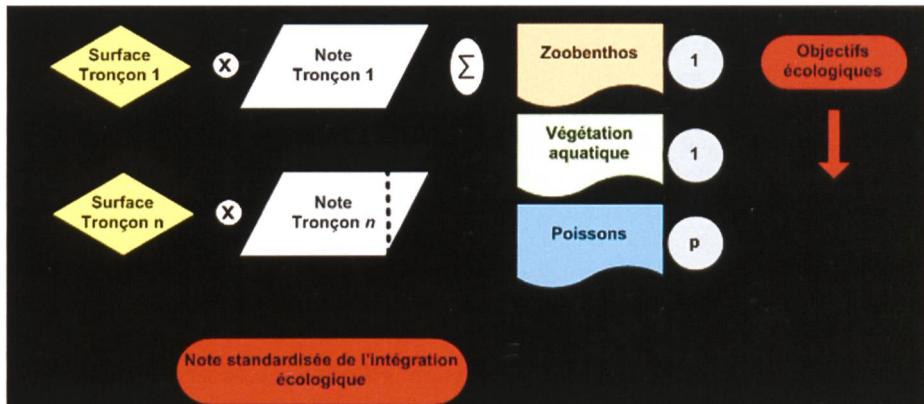


Figure 5. Procédé d'agrégation pour la détermination de la note d'intégration écologique.

imposante pour un barrage est sa hauteur. Un tel ouvrage crée en effet une coupure visuelle importante dans l'élément particulièrement longiligne qu'est une rivière.

L'emplacement du barrage, indépendamment des considérations techniques, peut être déterminant pour l'intégration de l'ouvrage dans le paysage. Deux options sont à prendre en compte dès la conception du projet. On peut soit chercher à fondre le barrage dans le paysage, soit au contraire chercher à le mettre en évidence. Ce choix d'intégration dans le site ne peut se faire qu'après une étude générale du secteur et une connaissance d'une part du concept général qui guidera la future utilisation du site et d'autre part des paramètres techniques du barrage, tel que par exemple, son accessibilité, la présence de superstructures techniques ou non, et sa hauteur totale, à mesurer depuis le plan d'eau aval jusqu'au sommet de la construction.

La seconde dimension importante d'un barrage est sa largeur, plus précisément sa longueur de couronnement. Bien que cette dernière soit strictement liée à la largeur de la rivière, relativement constante pour un tronçon donné, on peut toutefois admettre un barrage en plusieurs parties, pour autant que ces dernières soient reliées entre elles. Le nouveau paramètre n'est ainsi plus la longueur de couronnement du barrage mais la longueur de couronnement de chacune de ses deux parties. Cette division peut être créée, par exemple, par la construction d'une île entre l'évacuateur des crues et la centrale.

La retenue, qui intègre le plan d'eau en lui-même ainsi que les aménagements relatifs à celui-ci, notamment les digues rendues nécessaires par la surélévation du plan d'eau amont, est en surface l'élément le plus important et peut prendre

également en coupe une réalité très imposante. En effet, il faut surélever les digues existantes et construire les digues manquantes de sorte à ce que la surface inondée ne dépasse pas le potentiel submersible.

Les mêmes éléments paysagers sont à prendre en compte que ceux évoqués dans la problématique de l'intégration du barrage ou des arrière digues, cependant, dans le cas des digues principales, leur présence est très souvent plus imposante de par leur hauteur et leur fonction très visible de digue, l'eau étant retenue en permanence sur un des côtés.

Il est dès lors indispensable d'étudier la coupe de ces digues qui d'une part doit répondre à un plan d'eau qui varie quotidiennement en hauteur au gré du marnage, ce qui selon le type de coupe laisse visible une bande de boue grisâtre et humide de plusieurs mètres et d'autre part répondre de son côté sec à un paysage préexistant qui doit s'accommoder d'une importante rupture topographique et d'un nouveau compartimentage géographique.

Les aménagements annexes, d'un point de vue paysager, doivent s'intégrer dans le site et permettre par leur utilisation la mise en valeur de la retenue. Que ce soit des bâtiments (vestiaires, restaurants, halles de sports, toilettes, commerces, bâtiments techniques pour la centrale électrique, etc.) ou des aménagements de circulation (parking, route d'accès, arrêt de bus), des chemins piédestres, pistes cyclables et cheminements équestres ou des biotopes créés artificiellement, il faut dans tous les cas que ces derniers soient judicieusement intégrés dans le site. Une étude particulière est sans doute nécessaire pour chacun d'eux, afin d'une part permettre au site de se développer grâce aux nouvelles caractéristiques qu'il offre et d'autre part

rendre possible l'intégration de ce secteur réaménagé, dans le contexte paysager et urbanistique général.

Afin de permettre une intégration paysagère optimale, il est important de se rendre compte que tous ces éléments contribuent à cette intégration et de noter qu'aussi bien pour le barrage que pour les digues et même les installations annexes, une préférence doit être donnée pour des ouvrages à fonctions et utilisations multiples. Ainsi le mur latéral du barrage peut aussi avoir la fonction de mur de soutien pour un ouvrage secondaire, le couronnement peut devenir également un pont sur la rivière, les digues des promenades pédestres ou cyclables, le plan d'eau un espace de sports et loisirs et/ou même développer des secteurs protégés pour favoriser la création de biotopes, les côtés «sec» des digues des surfaces boisées, ou des prairies maigres s'offrant aux loisirs des habitants des urbanisations proches, etc.

6. Conclusion et perspectives

Il paraît peu probable de retrouver un jour une dynamique naturelle dans les hydro-systèmes, mais il est dorénavant indispensable de prendre les plus grands soins lors des aménagements de cours d'eau. L'homme dispose de connaissances scientifiques permettant d'atténuer certains effets négatifs des aménagements lors de leur implémentation. A travers le projet Synergie, le Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes, le Laboratoire de Constructions Hydrauliques, le laboratoire de Paysage et Architecture de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ainsi que les partenaires Stucky SA et VA Tech SA espèrent harmoniser l'exploitation de cours d'eau déjà modifiés (production énergétique, protection contre les crues et création d'espaces de détente) avec les aspects écologiques (création de biotope, amélioration des conditions environnementales du cours d'eau, solution à la problématique du marnage). A travers cet article, l'aspect et l'approche systémique environnementale/écologique du système complexe que comprend la rivière et son aménagement a été mise en avant dans le cadre du projet de recherche multidisciplinaire Synergie.

La validation du modèle dans son ensemble s'annonce assez difficile, et une application numérique devra être effectuée d'une part individuellement par module et d'autre part globalement sur l'ensemble du modèle écologique.

Finalement, le modèle «écolo-

gique» devra être couplé de manière plus précise aux autres volets du projet Synergie dans la perspective d'optimiser de manière globale les prises de décision pour le projet selon les demandes des politiques. L'étude de l'intégration visuelle de l'ouvrage devra s'effectuer une fois le site choisi puisque les paramètres en jeux sont directement dépendants de la location géographique du complexe.

Le but à l'échéance du projet est un véritable outil pour le transfert à la pratique qui soit à la fois simple et convivial à l'utilisateur et qui repose sur une base scientifique solide.

Remerciements

Ce travail de recherche est supporté financièrement par la Commission suisse pour la Technologie et l'Innovation (CTI, projet n° 6794.1 FHS – IW), en partenariat avec les Forces Motrices Valaisannes (FMV), le Service des Forces Hydrauliques du Valais (SFH – VS) et l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFG, projet Rhône – Thur). Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques ainsi que le bureau d'ingénieur Stucky SA apportent leur soutien respectif pour les domaines hydrauliques et techniques. Egalement un grand merci aux relecteurs.

Références bibliographiques

- Adriaenssens, V., B. DeBaets, et al. (2004). «Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management.» *The Science of the Total Environment* 319: 1–12.
- Amoros, C. and G. E. Petts (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris.
- Bornette, G., C. Amoros, et al. (1998). «Aquatic plant diversity in riverine wetlands: the role of connectivity.» *Freshwater Biol* 39(2): 267–283.
- Bovee, K. D. (1982). *A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. I.F.I.P. 12. Fort Collins, CO, USFWS/ OWS: 188.
- Céraghino, R. and P. Lavandier (1998). «Influence of hypolimnetic hydropoeaking on the distribution and population dynamics of Ephemeroptera in a mountain stream.» *Freshwater Biology* 40(2): 385–399.
- Dowla, F. U. and L. L. Rogers (1995). *Solving Problems in Environmental Engineering and Geosciences with Artificial Neural Networks*, The MIT press.
- Enea, M. and G. Salemi (2001). «Fuzzy approach to the environmental impact evaluation.» *Ecological Modelling* 135: 131–147.
- Frutiger, A. (2004). «Ecological impacts of hydroelectric power production on the River Ticino. Part 1: Thermal effects.» *Archiv für Hydrobiologie* 159(1): 43–56.
- Ginot, V. (1998). Logiciel EVHA. *Evaluation de l'Habitat physique des poissons en rivière ver*. 2. Lyon/Paris, Cemagref BEA/LHQ.
- Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Direction de l'eau.
- Heller, P. (2005). Analyse et objectifs de gestion d'un aménagement hydraulique fluvial à buts multiples. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône – Nouveaux développements dans la gestion des crues, Martigny, Switzerland.
- Lamouroux, N. and Y. Souchon (2002). «Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams.» *Freshwater Biology* 47(6): 1531–1542.
- Lek, S. and J. F. Guégan (1999). «Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction.» *Ecological Modelling* 120: 65–67.
- Loizeau, J. L. and J. Dominik (2000). «Evolution of the Upper Rhône River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva.» *Aquatic Sciences* 62: 54–67.
- Malard, F., D. Galassi, et al. (2003). «Longitudinal patterns of invertebrates in the hyporheic zone of a glacial river.» *Freshwater Biology* 48: 1709–1725.
- Malard, F., K. Tockner, et al. (2002). «A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors.» *Freshwater Biology* 47(4): 621–640.
- McKone, T. E. and A. W. Deshpande (2005). «Can Fuzzy Logic bring Complex Environmental Problems into Focus?» *Environmental Science & Technology*: 42–47.
- Meile, T., A. Schleiss, et al. (2005). Entwicklung des Abflussregimes der Rhône seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône – Nouveaux développements dans la gestion des crues, Martigny, Switzerland.
- Nilsson, C. and M. Dynesius (1994). «Ecological Effects of River Regulation on Mammals and Birds – a Review.» *Regulated Rivers-Research & Management* 9(1): 45–53.
- Nilsson, C., A. Ekblad, et al. (1991). «Long-term effects of river regulation on river margin vegetation.» *Journal of Applied Ecology* 28: 963–987.
- Obach, M., R. Wagner, et al. (2001). «Modelling population dynamics of aquatic insects with artificial neural networks.» *Ecological Modelling* 146: 207–217.
- OFEFP (1998). *Ecomorphologie niveau R*. Berne, OFEFP.
- OFEFP (1998). *Système modulaire Gradué*. Berne, OFEFP.
- Parasiewicz, P., S. Schmutz, et al. (1998). «The effect of managed hydropower peaking on the physical habitat, benthos and fish fauna in the River Bregenzerach in Austria.» *Fisheries Management and Ecology* 5: 403–417.
- Poff, N. L., J. D. Allan, et al. (1997). «The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration.» *Bioscience* 47(11): 769–784.

- Richter, B. D. and H. E. Richter (2000). «Prescribing Flood Regimes to Sustain Riparian Ecosystems along Meandering Rivers.» *Conservation Biology* 14(5).
- Schleiss, A. (2000). «Potentiel hydroélectrique de l'arc alpin.» *Bulletin SEV/VSE* 2(2): 13–21.
- Schleiss, A. (2005). Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône – Nouveaux développements dans la gestion des crues, Martigny, Switzerland.
- Silk, N. and K. Ciruna (2004). *A Practitioner's Guide to Freshwater Biodiversity Conservation*. Boulder, Colorado, The Nature Conservancy.
- Silvert, W. (1997). «Ecological impact classification with fuzzy sets.» *Ecological Modelling* 96: 1–10.
- Silvert, W. (2000). «Fuzzy indices of environmental conditions.» *Ecological Modelling* 130: 111–119.
- The MathWorks, I. (2005). *Model-Based Calibration Toolbox – For use with MatLab and Simulink – Model Brower User Guide*.
- Tockner, K. and J. V. Ward (1999). «Biodiversity along riparian corridors.» *Large Rivers* 11(3): 293–310.
- Valentin, S. (1995). Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques: effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivière. Laboratoire Hydroécologie Quantitative – Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques – CEMAGREF, Lyon, Université Claude Bernard – Lyon I: 263 pages.
- Wade, A., G. M. Hornberger, et al. (2001). «On modeling the mechanisms that control instream phosphorous, macrophyte, and epiphyte dynamics: an assessment of a new model using general sensitivity analysis.» *Water Ressources Research* 37(11): 2777–2792.
- Wade, J. V., P. G. Whitehead, et al. (2002). «On modelling the flow controls on macrophyte and epiphyte dynamics in a lowland permeable catchment: the River Kennet, southern England.» *The Science of the Total Environment* 282–283: 375–393.
- Ward, J. V., F. Malard, et al. (1999). «Influence of ground water on surface water conditions in a glacial flood plain of the Swiss Alps.» *Hydrological Processes* 13(3): 277–293.
- Zadeh, L. A. (1965). «Fuzzy Sets.» *Inform. Cont.* 8: 338–353.
- Zadeh, L. A. (1995). Foreword. *Fuzzy Logic Tool-* box User's Guide ver.2. I. The MathWorks, Natick, MA.
- Zimmermann, H. J. (1985). *Fuzzy Set Theory – and its applications*. Hingham, MA, Kluwer Academic.
- Adresse des auteurs:
Pellaud Marc, Iorgulescu Ion, et Rodolphe Schlaepfer
 EPFL – ENAC – ISTE – GECOS
 GR A1 454
 Station 2
 CH-1015 Lausanne
 marc.pellaud@epfl.ch
 ion.iorgulescu@epfl.ch
 rodolphe.schlaepfer@epfl.ch
 http://gecos.epfl.ch/
- De Pourtalès Thierry,
 EPFL – ENAC – ICARE – LCH
 GC A3 504
 Station 18
 CH-1015 Lausanne
 thierry.depourtalès@epfl.ch



Mobiler Hochwasserschutz.

Mit dem neuen Hochwasserschutz-System sind Bevölkerung und Umwelt vor Überraschungen geschützt. Schnelle Montage, geltende Normen, praktische Lagerung und einfacher Transport. Fragen Sie uns an, wir sind seit Jahren auf dem Gebiet der Umwelttechnik tätig.

SISTAG Absperrentechnik
 CH-6274 Eschenbach
 Telefon 041 449 99 44
 Telefax 041 448 34 31
 www.sistag.ch
 E-Mail: info@sistag.ch

SISTAG