

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	100 (2008)
Heft:	2
Artikel:	Aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples : résolution du marnage artificiel et bénéfices écologiques, énergétiques et sociaux
Autor:	Heller, Philippe / Schleiss, Anton
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-939693

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: 12.01.2026

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

Aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples: résolution du marnage artificiel et bénéfices écologiques, énergétiques et sociaux

Philippe Heller, Anton Schleiss

Résumé

D'importants travaux sont actuellement entrepris dans le contexte de la gestion des crues et de la renaturation des cours d'eau alpins. Pour bénéficier totalement du potentiel pluridisciplinaire de ces deniers, les projets entrepris doivent intégrer des aspects aussi larges que la production d'énergie, la gestion des crues, la revitalisation du cours d'eau et de ses berges, les loisirs aquatiques ainsi que l'intégration paysagère. L'intégration de ces différents domaines au sein d'un même aménagement à buts multiples génère un système dont l'étude est complexe. La recherche de solutions optimales qui produisent le plus de synergie doit ainsi s'effectuer en deux étapes successives, soit une analyse qualitative suivie d'une analyse quantitative. Cet article développe le modèle quantitatif ainsi que les outils d'optimisation qui intègrent la conception et la gestion de projets fluviaux à buts multiples. Une clé objective de répartition des coûts entre les principaux partenaires du projet est également présentée. La méthodologie complète est appliquée à un aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples sur le Rhône suisse alpin supérieur.

Abstract

Flood protection and ecological rehabilitation of alpine rivers require significant training works. In order to develop the still significant multipurpose potential of rivers, new projects have to integrate many aspects as energy production, flood routing, ecological rehabilitation, leisure activities and landscape integration. Such multipurpose projects have a high degree of complexity and have therefore to be assessed as a complex system. The identification of possible solutions has first to be based on a qualitative analysis. This article presents the second step based on the related quantitative model and the optimization tools which integrate conception and operation of multipurpose run-of-river projects. An objective key for cost sharing between the main partners of the project is also proposed. The developed methodology is applied on a multipurpose hydroelectric run-of-river project on the Upper Swiss Rhone River.

1. Introduction

Les échecs répétés ainsi que les difficultés liées à la mise en œuvre de nouveaux ouvrages hydroélectriques dans les pays industrialisés montrent l'évolution du paradigme qui gère les rapports entre la société humaine et la nature. Les problèmes issus de ces ouvrages, souvent ignorés lors de la planification, ajoutés à la volonté populaire de restaurer un état naturel, nécessitent des analyses environnementales tant pour les nouvelles constructions que pour la restauration d'ouvrages ou encore la correction de cours d'eau. La prise en compte des aspects énergétiques et écologiques, joints aux aspects sécuritaires, financiers et socio-économiques, transforme la conception des ouvrages hydrauliques à buts multiples en un problème complexe. La conception, le dimensionnement et la gestion de tels aménagements nécessitent ainsi de nouvelles approches.

La méthodologie développée comprend quatre phases principales. Elle débute par une analyse qualitative du sys-

tème formé par un aménagement fluvial à buts multiples et de ses interactions avec son environnement. Sur la base des résultats de cette analyse, les objectifs de l'aménagement sont alors formulés. Pour chacun de ces objectifs, la seconde étape consiste à développer un modèle quantitatif de simulation. Ces modèles permettent de quantifier la réponse de l'aménagement sur son environnement. La troisième étape est une génération de solutions optimales au sens de Pareto. Elle est basée sur les outils de simulation développés à l'étape précédente. Finalement, la dernière étape consiste en une série de filtres successifs qui aboutissent aux solutions synergiques ainsi qu'à une clé de répartition des coûts.

La réflexion est développée en parallèle à un cas d'étude sur le Rhône valaisan. Ce dernier est conditionné dans son état actuel par deux corrections successives (fin XIX^{ème} et milieu XX^{ème} siècle) ainsi que par l'exploitation des aménagements de production hydroélectrique à haute

chute des vallées latérales. Sa morphologie tout comme son régime hydrologique sont donc fortement perturbés. Cet état offre un potentiel important de dévelo-

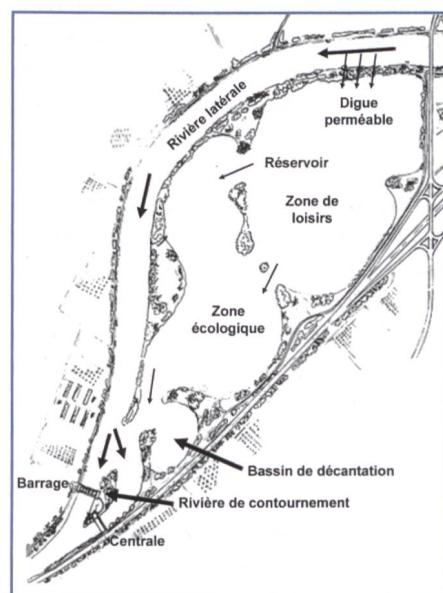


Figure 1. Concept initial d'un réservoir à buts multiples (Bollaert et al., 2000).

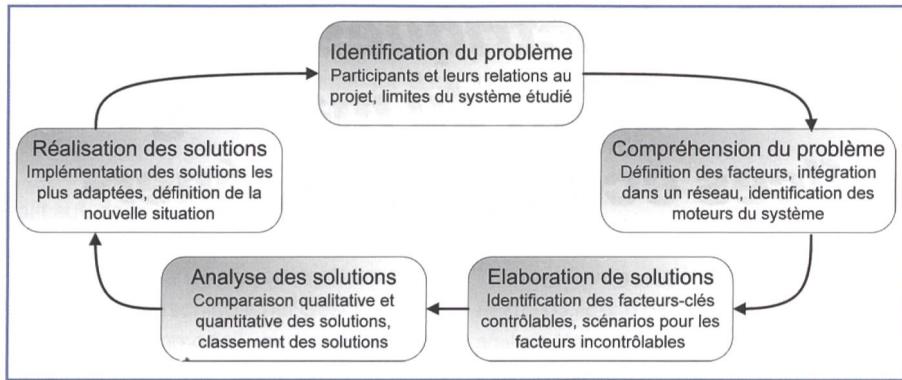


Figure 2. Les cinq étapes de la méthode de Gomez et Probst (1995).

pement tant écologique que d'utilisation sociale (loisirs aquatiques notamment). La réflexion est basée sur un réservoir à buts multiples situé parallèlement au cours d'eau principal et alimenté essentiellement par l'aval (Schleiss, 2006). La Figure 1 illustre un tel aménagement.

2. Analyse qualitative

Fondé sur la dynamique des systèmes, ce travail débute par une modélisation qualitative du système complexe étudié. Il s'agit principalement d'en comprendre le fonctionnement interne par les relations qui existent entre ses différentes parties et son environnement. Cette compréhension permet de cerner, d'une part, les problèmes existants au sein du système actuel et, d'autre part, les attentes des principaux intervenants quant à des modifications possibles ou souhaitées.

La modélisation qualitative est effectuée à l'aide de la méthode de Gomez et Probst (1995). Cette méthode, cyclique, développée initialement pour des problèmes économiques, comprend cinq étapes distinctes. Il s'agit d'identifier le problème en le regardant sous différents angles, pour pouvoir comprendre les relations qui existent entre les différents partenaires du problème. Cette analyse doit permettre, par la mise en évidence des facteurs-clés, d'élaborer des solutions qu'il faut analyser par le biais d'indicateurs afin de pouvoir prendre les mesures nécessaires pour réaliser la solution la plus prometteuse. La réalisation génère une nouvelle situation qui engendre de nouveaux problèmes. La Figure 2 illustre les différentes étapes de la méthode.

Pour permettre une modélisation qualitative physique du système étudié avec la méthode proposée par Gomez et Probst (1995), des adaptations sont nécessaires. Il faut, d'une part, se limiter à une approche physique exclusivement par opposition à la pluralité des approches logiques possibles. D'autre part, il est né-

cessaire d'étendre le concept d'activité et de réactivité des facteurs (profondeur d'agrégation des influences). Les développements liés spécifiquement au logiciel PACEVs (Heller, 2006) apportent en plus la notion de distribution spatiale (rayon d'action) et transforment la notion l'activité (ou réactivité) en notion d'impact (distinction des effets désirables de ceux indésirables).

Afin de valider les extensions de la méthode, une analyse de sensibilité est menée sur la base du cas d'étude. Elle porte, d'une part, sur le modèle lui-même avec l'intensité des relations choisies par les experts et, d'autre part, sur la profondeur d'agrégation des influences. Cette analyse conclut que la méthode est applicable de manière fiable sur les facteurs principaux du système. Une réserve est cependant émise pour le classement des facteurs secondaires du système (facteurs de moindre importance).

L'application de la méthode iden-

tifie un classement des différents facteurs dans trois groupes distincts. Le premier groupe rassemble les facteurs liés au dimensionnement, le second groupe les facteurs liés à la gestion et le dernier groupe les facteurs qui sont les indicateurs du projet. Dans chacun des trois groupes, les facteurs-clés sont mis en évidence. Ce sont, pour le premier groupe, les dimensions du réservoir, le débit équipé de la centrale ainsi que celui de la rivière de contournement. Le second groupe est réduit à une seule variable de gestion, soit le débit sortant de l'aménagement. Enfin, le dernier groupe relève l'écologie aval, les aspects financiers, socio-économiques, énergétiques ainsi que l'impact sur la nappe phréatique (Heller et al., 2005a).

L'étude qualitative conclut sur la nécessité de développer une approche quantitative. Elle apporte les bases nécessaires aux différents modèles de simulation et distingue clairement les systèmes décisionnel et physique de l'aménagement. Cette distinction permet de casser la complexité du système. Le lien entre ces deux sous-systèmes est constitué par le «débit sortant», appelé variable «pivot».

3. Analyses quantitatives

Les aspects décisionnels étant traités directement dans la partie méthodologie, les aspects quantitatifs ou physiques peuvent être abordés par des modèles partiels de simulation. Afin de respecter les différents aspects mis en lumière par l'analyse qualitative, autant d'outils de simulation que de thèmes abordés sont développés. Ce sont

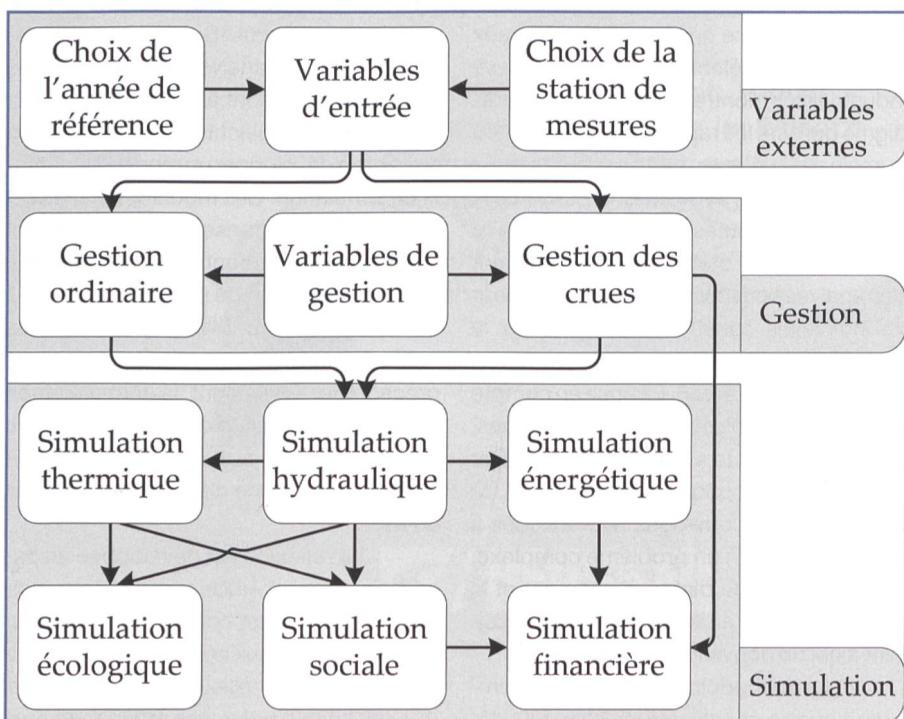


Figure 3. Articulation des modèles de simulation.

tout d'abord la gestion ordinaire de l'aménagement ainsi que la gestion en situation de crue. Ces deux outils permettent de déterminer le fonctionnement hydraulique, c'est-à-dire le débit écoulé à l'aval de l'aménagement. Les autres outils de simulation sont directement dépendants de la gestion. Les aspects hydrauliques (du réservoir), énergétiques, thermiques, écologiques et sociaux découlent en effet uniquement, pour un aménagement donné, des choix liés à la gestion. La simulation financière est en partie influencée par les outils précédents (revenus liés au fonctionnement de l'aménagement) et en partie dépendante de l'aménagement lui-même (investissement initial). Les différents modules de simulation sont représentés à la Figure 3 avec leur articulation relative.

3.1 Modèle de gestion ordinaire

Le modèle de gestion ordinaire détermine pour chaque heure le débit aval optimal qui sort du réservoir (modèle applicable en dehors des situations de crues). Il est utilisé en permanence à l'exclusion des situations de crue. Il est basé sur une prévision des apports hydrauliques à 96 heures pour une planification de 48 heures. Le modèle calcule le débit aval de manière à maximiser, en tout temps, le taux de remplissage de la retenue. Il répond à l'équation suivante:

$$\text{Max} \left(\sum_{t=1}^{96} \frac{H_{\text{res}}(t)}{H_{\text{res,max}}} \right) \quad (1)$$

où $H_{\text{res}}(t)$ est le niveau du plan d'eau du réservoir à l'instant t et $H_{\text{res,max}}$ le niveau maximal du réservoir. L'objectif mathématique du modèle permet de maximiser la production d'énergie (maximisation de la

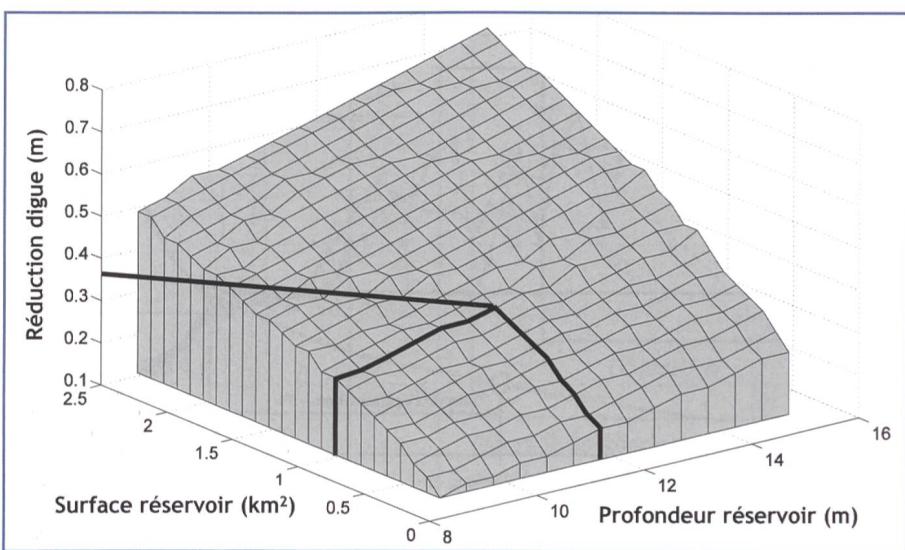


Figure 5. Abaissement potentiel des digues aval pour différents volumes de rétention.

chute) tout stabilisant le niveau du réservoir (minimisation des battements) et en maximisant ainsi l'utilité social de ce dernier. Le modèle intègre l'objectif premier de la gestion ordinaire, soit de tranquilliser le débit aval, sous forme de contrainte. Il limite les variations du débit aval à l'aide d'un gradient (Halleraker et al., 2003) et d'une amplitude maxima. De la sorte, il respecte, pour la rivière aval, les attentes écologiques liées au réservoir. L'optimisation du débit aval est calculée par le logiciel AMPL (Fourer et al., 2003). La Figure 4 illustre la gestion proposée pour une semaine hivernale typique.

Les valeurs des contraintes (amplitude et gradient) sont définies par des variables qui constituent les leviers du modèle de gestion ordinaire. Elles peuvent être optimisées en même temps que les paramètres géométriques du réservoir (c.f. paragraphe 4). Avec les valeurs proposées pour la gestion (gradient à 8 cm/h et ampli-

tude à 30 cm en hiver et 12 cm/h et 40 cm en été), le modèle permet une atténuation du marnage fort (supérieur à 10 cm/h) supérieure à 80% pour une perte énergétique inférieure à 10% (Heller et al., 2006). Ces limites permettent de reconstituer des conditions écologiques quasi naturelles.

3.2 Modèle de gestion de crue

Le modèle de gestion des crues poursuit un objectif double. Il établit tout d'abord, selon les possibilités de gestion de l'aménagement pendant les situations de crue, les règles relatives au fonctionnement de ce dernier (Heller et al., 2005b). Ensuite, pour les différents modèles de fonctionnement, il établit l'influence de la rétention sur la statistique des débordements aval. Par ce biais, il permet la comparaison financière entre l'augmentation de la capacité aval et l'augmentation de la rétention. Sur la base d'un risque résiduel constant, le modèle permet de calculer l'abaissement potentiel des digues aval pour un réservoir donné. La Figure 5 illustre l'abaissement potentiel pour différentes tailles de réservoir possible.

Les lignes noires illustrent un volume de rétention composé d'un réservoir de 1 km² et 8,5 m de profondeur avec un volume d'épanchements de 1 km² et 3 m de profondeur. Ce volume conduit, pour le Rhône valaisan à la hauteur de Branson, à une réduction potentielle de la hauteur des digues aval de 36 cm. Cet abaissement peut être estimé financièrement à une valeur de 40 Mio CHF.

3.3 Modèle hydraulique

Le modèle de fonctionnement hydraulique du réservoir répond à la seule équation de la continuité pour décrire l'effet de la rétention. Il admet une relation hauteur-volume

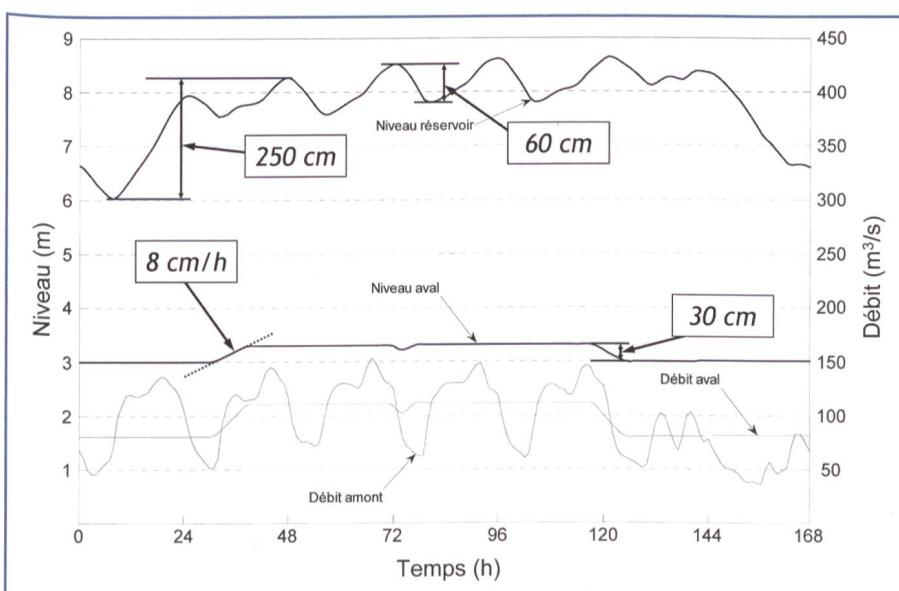


Figure 4. Semaine hivernale avec la gestion optimale proposée.

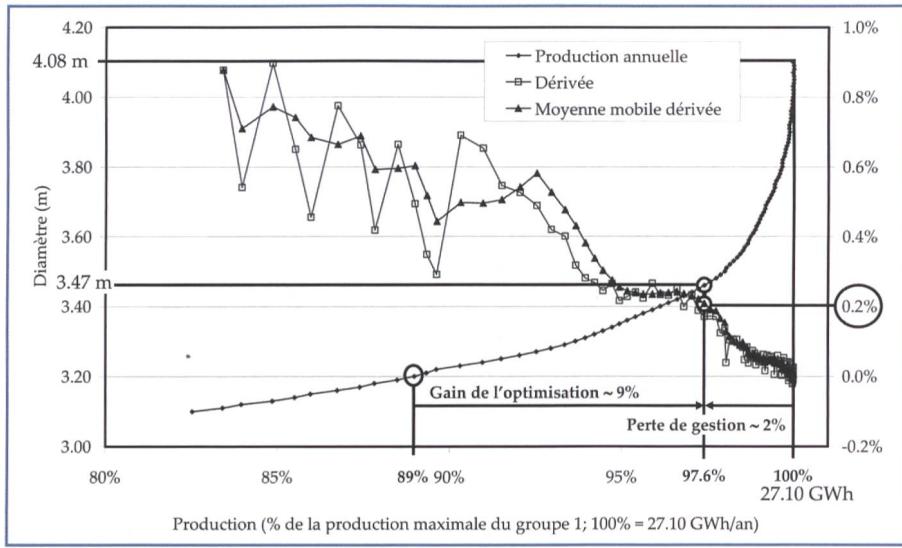


Figure 6. Variabilité de la production énergétique en fonction du diamètre de la turbine.

du réservoir (et de la courbe de remous de la rivière amont) qui fixe, en fonction du volume présent, le niveau dans le réservoir. Le modèle hydraulique répond aux équations suivantes:

$$V_{res}(t+1) = V_{res}(t) + 3600 * (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) \quad (2)$$

$$H_{res}(t+1) = f(V_{res}(t+1)) \quad (3)$$

Les résultats du modèle hydraulique sont implicitement contenus dans les résultats des modèles de gestion.

3.4 Modèle énergétique

Le modèle énergétique, développé pour des turbines Kaplan a pour objectif de déterminer la production annuelle d'énergie en fonction des machines hydromécaniques installées. Le modèle doit donc tout d'abord déterminer les principaux paramètres de dimensionnement de ces dernières (diamètre de la roue et vitesse de rotation) pour ensuite en déduire la production. Le dimensionnement est effectué sur une colline adimensionnelle adaptée aux basses chutes (jusqu'à 10 m environ). A cause de la forte variabilité du débit turbiné comme de la chute disponible (conséquence du modèle de gestion de l'aménagement), le dimensionnement des machines hydromécaniques requiert une optimisation propre. Cette optimisation est effectuée de manière itérative sur les différents diamètres possibles de la turbine à hélice de même que sur les vitesses de rotation relatives. La Figure 6 illustre la variabilité de la production annuelle du groupe principal en fonction des différents diamètres de la machine et de la vitesse de rotation optimale

pour chacun d'eux. Le critère de choix du diamètre est basé sur la moyenne mobile de la dérivée (taux limite fixé à 0,2%).

Dans le cas du Rhône valaisan à Branson, l'optimisation énergétique conduit à un diamètre de la machine d'environ 3,5 m. Une étude de sensibilité sur les différents paramètres de l'aménagement (surface, hauteur, débit équipé) aboutit à un rendement global unique de toute la chaîne énergétique à hauteur d'environ 85% (ratio entre énergie brute et énergie électrique).

3.5 Modèle thermique

Le modèle thermique simule l'évolution thermique du réservoir uniquement. Toutefois, avec l'hypothèse d'un brassage parfait du débit aval, il permet également de déterminer l'évolution de la température du cours d'eau aval. Basé sur une cellule unique, il calcule la température moyenne du réservoir. Le modèle est basé sur les différents flux thermique du réservoir en interaction avec son environnement (flux

solaire direct, émission des corps chauds, conduction du soussol, conduction/convection de l'air et évaporation du plan d'eau) ainsi que sur les apports hydrauliques. Il est motivé tant par les aspects écologiques que sociaux (utilisation du réservoir à des fins de loisirs aquatiques et risque de formation de brouillard). La Figure 7 illustre l'évolution de la température simulée du cours d'eau aval et du réservoir pour l'année 1993. Les résultats de simulation montrent une influence négligeable sur la rivière aval (courbes grise et noire quasi superposées). La température moyenne du réservoir peut évoluer en été entre 15 et 20°C selon le débit qui transite à travers la digue perméable.

3.6 Modèle écologique

Le modèle écologique est développé dans le cadre d'une thèse parallèle (Pellaud, 2007). Il s'applique uniquement à des systèmes lotique (exclusion des systèmes lentiques comme le réservoir lui-même). Il permet de déterminer en fonction de la morphologie du cours d'eau et du régime hydrologique (impact de la réduction du marnage) l'évolution de la richesse prédictive pour les invertébrés (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères) ainsi que la surface utile pour quatre guildes de faune piscicole (mouille, radier, berge et cours principal).

3.7 Modèle social

Le modèle social poursuit un objectif double. Il estime tout d'abord la valeur financière d'une visite sur le site du réservoir effectuée à des fins de loisirs aquatique. Cette valeur est estimée avec la méthode du coût du transport basée sur une enquête réalisée sur l'ensemble du Valais. Compte tenu des activités nautiques possibles sur le réservoir, la valeur financière

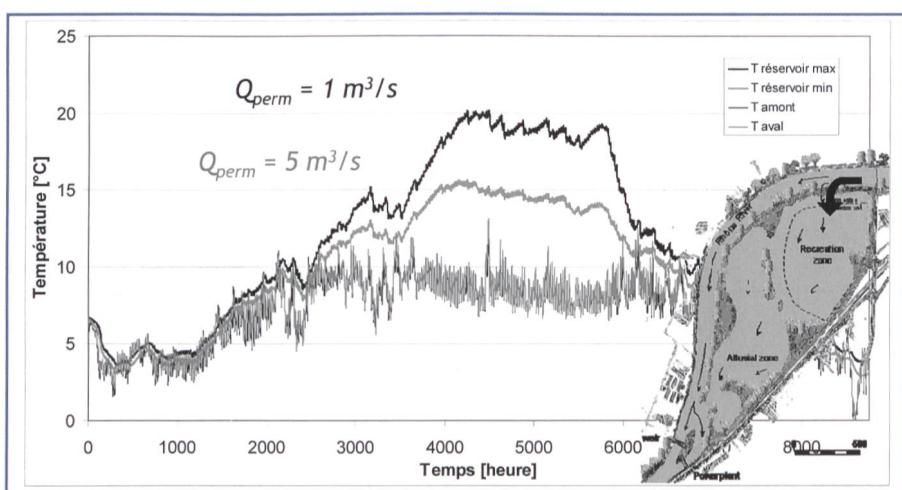


Figure 7. Evolution de la température du cours d'eau aval et du réservoir en fonction du débit à travers la digue perméable, année 1993.

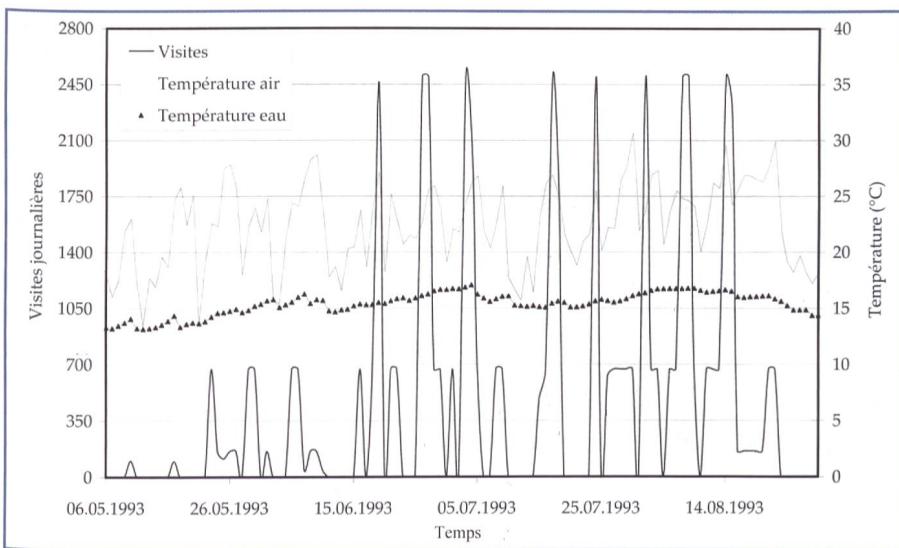


Figure 8. Fréquentation simulée du site du réservoir à des fins de loisirs pendant l'été 1993.

est estimée à 46 CHF par visite. Dans un second temps, le modèle estime la fréquentation estivale du réservoir. Elle est déduite à partir de la fréquentation d'un site existant (Île de Sion) lui-même calé sur le chiffre d'affaire du restaurant de ce site (restaurant des îles de Sion). Compte tenu des activités nautiques possibles, du déplacement géographique (proximité de la population résidente) et d'une fonction de préférence qui considère les battements du réservoir, la température de l'air et celle de l'eau, le modèle estime la fréquentation journalière du site. La Figure 8 illustre cette fréquentation simulée pour la période estivale de l'année 1993.

Annuellement, le modèle prédit un total qui avoisine les 55 000 visites. Avec le montant unitaire de 46 CHF, l'aménagement représente une valeur annuelle d'environ 2,5 Mio CHF.

3.8 Modèle financier

Le modèle financier est basé sur un ensemble de prix unitaires qui sont multipliés aux quantités requises pour la construction de l'aménagement. Les quantités requises sont calculées à partir des variables de dimensionnement. Les facteurs d'échelle liés à la variation des prix unitaires par rapport aux quantités ne sont pas considérés. Le coût total est calculé par la sommation de onze coûts partiels. Ce sont:

- le réservoir: achat du terrain et traitement de la surface totale;
- la zone d'épanchement: achat du terrain et traitement de la surface des digues relatives;
- les digues: coût volumique des digues à construire pour le réservoir, la zone d'épanchement et la surélévation amont (courbe de remous de la rivière amont);

- les contre-canaux: coût linéaire à construire sur le périmètre du réservoir;
- le barrage en rivière: coût volumique du béton à mettre en place et coût de la masse d'acier composant les vannes;
- la centrale hydroélectrique: coût unitaire variable en fonction de la puissance installée;
- la rivière de contournement: coût linéaire de la rivière à créer avec une pente moyenne constante;
- les installations de chantier: pourcentage sur les sept premiers coûts (10%);
- l'intégration architecturale et écologique: pourcentage sur les coûts 3 à 6 (5%);
- les frais d'étude et d'imprévus: pourcentage des coûts 1 à 9 (15%);
- les frais financiers (inflation et intérêt intercalaire pendant la construction): pourcentage des coûts 1 à 10.

La modularité offerte par le modèle financier permet de modifier facilement la configuration de l'aménagement et d'en calculer son coût. Cette possibilité est largement utilisée pour les optimisations partielles (cf. paragraphe 4).

3.9 Résultats de simulation

Les résultats de simulation permettent tout d'abord de quantifier les produits délivrés par un aménagement donné pour une gestion donnée. Ils apportent ainsi une réponse quantifiée aux conséquences (positives ou négatives) du projet. En ce sens, l'ensemble des simulations constitue un outil adéquat pour évaluer l'impact des mesures techniques (dimensionnement et gestion) du projet sur son environnement.

Les résultats de simulation permettent également de comparer les différents

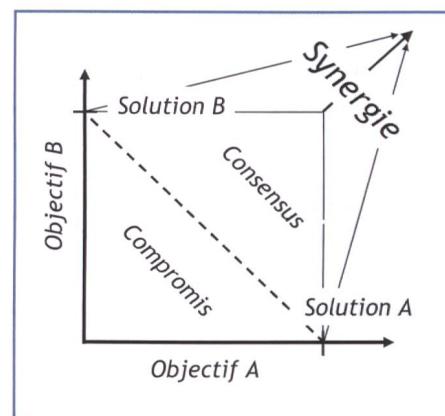


Figure 9. Solutions de compromis, de consensus et de synergie.

aménagements ainsi que leurs différentes gesticulations possibles. Moyennant des fonctions d'agrégation, les résultats bruts de simulation peuvent être réduits à quelques valeurs significatives. Ces valeurs représentent un projet donné. Par itération, il devient ainsi possible d'améliorer le projet initial, tout au moins de le faire évoluer dans la direction souhaitée.

Ces outils de simulation constituent un premier support d'aide à la décision. Dans les limites de validité des modèles développés, ces outils apportent une réponse indiscutable des conséquences physiques d'un projet hypothétique. Etant donné la rapidité de calcul (de l'ordre de la demimonde), il serait même envisageable d'exploiter ce potentiel d'adaptation en live au cours d'une négociation.

Selon la définition même du compromis, accord obtenu par concession réciproque (Larousse, 1994), cet outil d'aide à la décision permet d'aboutir à des solutions de cette nature. Il permet, en effet, d'accorder des points de vue divergents à la condition que chaque partenaire accepte de réduire ses prétentions.

4. Optimisation et génération de solutions

Passer du compromis au consensus requiert une étape supplémentaire. C'est l'objectif principal de la méthodologie développée. Habituellement, le consensus est défini comme un accord et un consentement général (tacite ou exprès) du plus grand nombre (Larousse, 1994). Dans ce travail, il est considéré comme une solution qui ne désavantage aucun des partenaires ce qui conduit au consentement général. Selon la Figure 9, les solutions de consensus dépassent le compromis en accordant de meilleures performances pour au moins un des objectifs. Elles appartiennent en quelque sorte au même genre que les solutions de Pareto. Les solutions synergiques

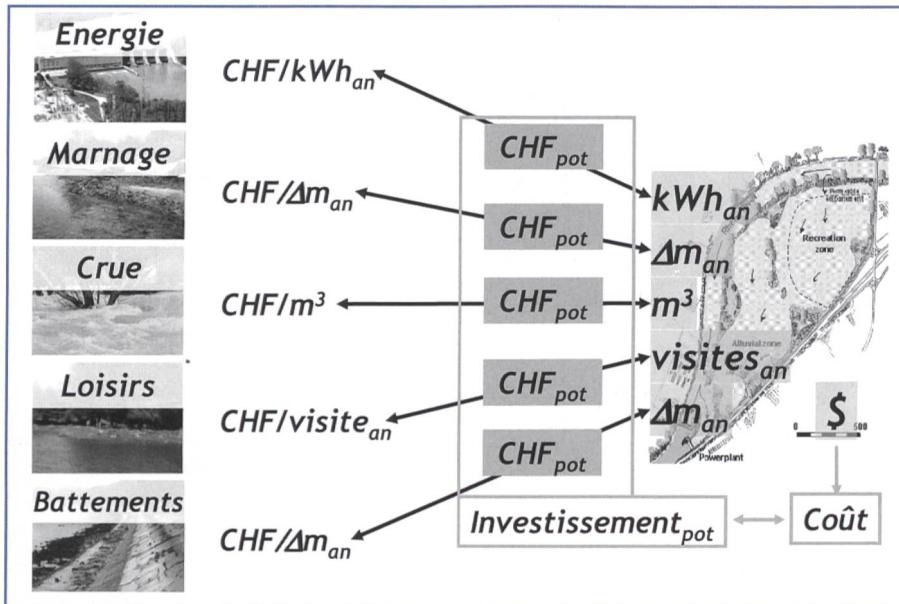


Figure 10. Clé de transfert par objectif et comparaison de l'investissement potentiel au coût total.

cherchent à dépasser le consensus. La méthodologie développée est basée sur un ensemble de procédés d'élimination de solutions potentielles pour ne retenir que les solutions réalisables. Elle considère, dans un premier temps, l'ensemble des solutions potentielles. Ce nombre de solutions correspond à la combinatoire des différentes variables de décision. S'il y a au moins une variable continue, ce nombre est théoriquement infini.

Le premier filtre est implicitement contenu dans le vecteur de contraintes qui limite l'espace admissible des variables de décision. Ainsi, pour autant que ces contraintes reproduisent les contraintes naturelles d'un site, les solutions restantes correspondent toutes à des solutions techniquement réalisables.

Le second filtre est réalisé par une optimisation multiobjectif. Le résultat de cette optimisation est un ensemble de solutions théoriquement optimales. Cette optimisation nécessite, pour faciliter la comparaison des objectifs, des optimisations partielles. Ces optimisations partielles (monoobjectives) établissent, pour chaque objectif, des clés de transfert entre l'investissement potentiel optimal et les produits délivrés. Par addition des investissements potentiels, il devient ainsi possible de comparer les différents objectifs d'un même aménagement entre eux ou vis-à-vis du coût total. Cette comparaison est illustrée à la Figure 10.

Le troisième filtre élimine les solutions optimales qui ne correspondent pas à une solution de consensus par rapport à au moins une solution optimale partielle. Ce filtre est appelé synergique. Il permet

ainsi de dépasser les solutions consensuelles. Il consiste à éliminer les solutions dont le coût dépasse l'investissement potentiel. L'indicateur de synergie, I_{syn} , est défini par l'équation:

$$I_{syn} = \frac{\left(\sum_{\text{objectifs}} P_i \cdot C_{u,i} \right) - C_{total}}{C_{total}} \quad (4)$$

où P_i est la quantité physique délivrée de l'objectif i , $C_{u,i}$ le coût unitaire optimal du même objectif et C_{total} le coût total de l'aménagement à buts multiples. Une solution est dite synergique si son indicateur de synergie, I_{syn} , est positif.

Le quatrième filtre est double. Il élimine les solutions synergiques qui ne correspondent pas aux attentes des partenaires par défaut de production ou par excès de coût. La Figure 11 illustre l'ensemble de la méthodologie développée par son organigramme fonctionnel.

Les solutions restantes sont donc des solutions techniquement réalisables, optimales au sens de Pareto,

synergiques, acceptables quant à la production de chacun des objectifs et payables par chacun des partenaires. Ces solutions constituent assurément une base de négociation autrement plus élaborée que celles basées sur la seule simulation. Elle présente par ailleurs l'avantage, pour un site donné, de n'inclure les aspects purement subjectifs qu'à la fin du processus. Il est donc très facile de modifier les paramètres du quatrième filtre pour obtenir de nouvelles solutions.

5. Application au cas d'étude

La modélisation qualitative d'un aménagement à buts multiples hypothétique sur le Rhône valaisan à Riddes permet de distinguer six thèmes principaux. Ce sont les aspects hydrauliques, les aspects énergétiques, les aspects socio-économiques, les aspects liés à la nappe phréatique et finalement les aspects écologiques. Pour chacun de ces six aspects, les facteurs-clés sont mis en évidence et attribués à l'une des trois catégories (dimensionnement, gestion, indicateur).

Analysé dans son ensemble, le système relève tout d'abord les principaux facteurs de dimensionnement, à savoir ceux qui touchent directement le réservoir (hauteur et surface), la passe à poisson (débit) et la production énergétique (débit équipé). Par agrégation, les variables de gestion sont réduites au seul débit sortant de l'aménagement. Cette variable constitue également la variable «pivot» entre les systèmes de modélisation physique et logique. Finalement, les indicateurs re-

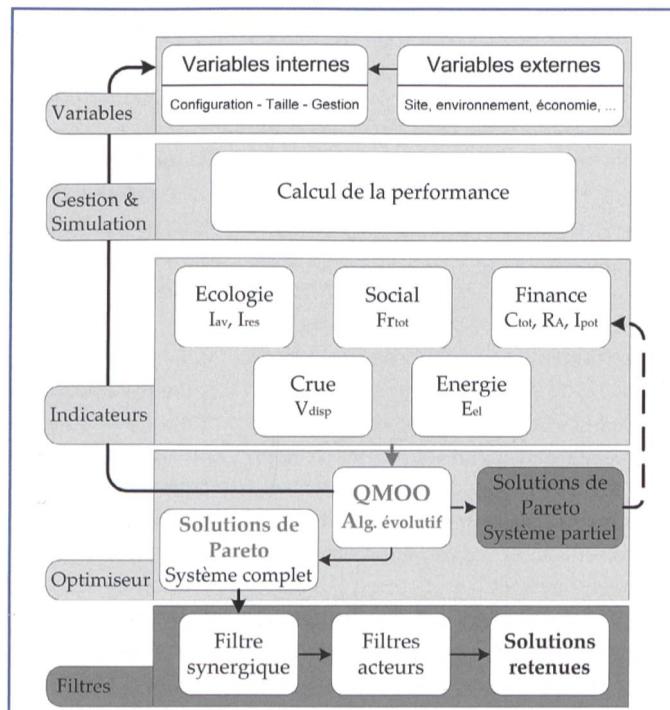


Figure 11. Organigramme de la méthodologie développée.

groupent l'ensemble des impacts du système tant pour les aspects écologiques, sociaux, financiers, énergétiques ainsi que ceux liés à la nappe phréatique.

L'ensemble des résultats qualitatifs forme l'étape initiale de la modélisation quantitative. Ils définissent les modèles nécessaires de simulation (hydraulique, énergétique, thermique, écologique, social et financier), les contraintes à respecter (vecteur des contraintes pour les variables de décision qui inclut implicitement la nappe phréatique) ainsi que l'articulation des modèles entre eux (résolution optimisée de la gestion comme étape initiale).

L'optimisation globale est développée sur la base des simulations,. Elle utilise l'algorithme d'optimisation QMOO (Leyland, 2002) en lui ajoutant deux fonctionnalités (mise en réseau d'ordinateurs, prise en compte de résultats de simulation qui n'entrent pas dans l'optimisation). Les résultats issus de QMOO sont des solutions situées sur des courbes de Pareto. L'investissement est compris entre 100 et 1000 Mio CHF. Les revenus bruts sont compris entre 100 et 500 Mio CHF.

L'application des trois filtres (synergique, acteurs-inférieur, acteurs-supérieur) permet d'éliminer l'essentiel des solutions optimales. L'agrégation finale exécutée manuellement permet d'aboutir à une solution unique. Cette solution peut être caractérisée par un réservoir légèrement supérieur à 0,6 km², une profondeur d'eau à l'amont du barrage située vers 8,0 m (chute utile d'environ 6,5 m) et un débit équipé de 250 m³/s. L'investissement total de cet aménagement est d'environ 180 Mio CHF et l'investissement potentiel de 198 Mio CHF. Cette solution offre donc un indicateur de synergie d'environ 10% (synthèse référence 1993). Les différentes solutions trouvées (2 pour 1993, 2 pour 1999 et la synthèse pour les deux années) sont représentées graphiquement à la Figure 12.

La Figure 12 illustre clairement le lien qui existe entre les trois axes «volume-coûtsynergie». A cause du coût élevé pour la construction des digues, l'augmentation du volume (de celui du réservoir et dans une moindre mesure de celui de la zone d'épanchement) conduit de manière importante à une élévation du coût total. En conséquence, l'indicateur de synergie baisse dans une proportion similaire. Ainsi, le classement des solutions sur l'axe du volume correspond à celui sur l'axe du coût mais est inversé sur l'axe de la synergie. A cause de la variabilité des valeurs des paramètres de gestion, le classement

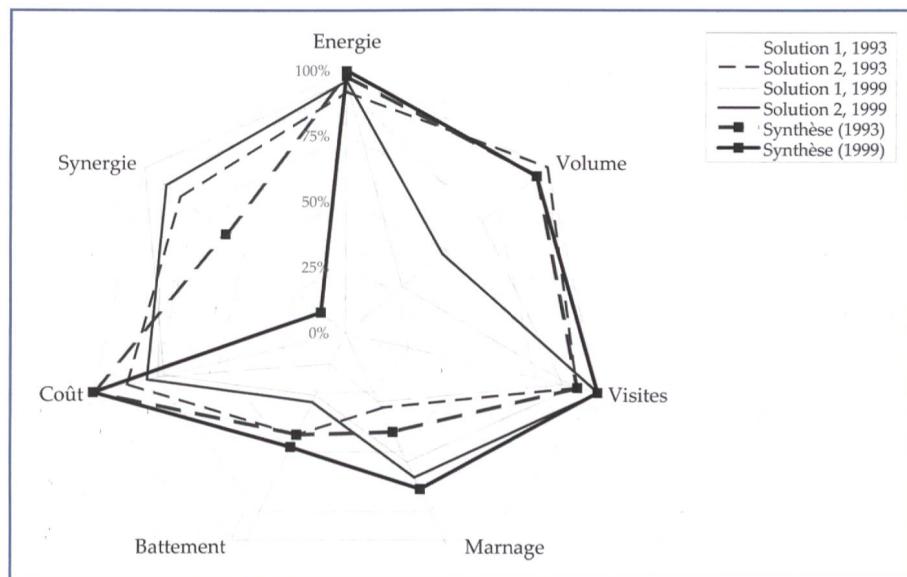


Figure 12. Représentation graphique des différentes solutions du cas d'étude de Rid des pour les deux années étudiées.

précédent n'apparaît pas aussi clairement sur les deux axes «marnage» et «battement». Enfin, les axes «énergie» et «visite» montrent peu de sensibilité pour les différentes variantes.

6. Conclusion

Ce travail de recherche, mené au sein d'une équipe pluridisciplinaire composée d'écologues, d'architectes, d'ingénieurs civils et mécaniciens, de producteurs d'hydroélectricité et de services étagés, a montré la pertinence de l'approche choisie qui a conduit à la faisabilité des solutions proposées. Par ailleurs, la modularité des méthodes développées (analyse qualitative, gestion du marnage, calcul probabiliste de l'impact de la rétention sur les crues, modèle de dimensionnement des turbines, optimisations partielles et complètes) offre de larges possibilités pour des utilisations partielles, pour des applications à d'autres ouvrages ou pour des développements ultérieurs.

La méthodologie complète,

développée en 12 étapes depuis l'analyse qualitative jusqu'aux solutions finales, est appliquée à un cas d'étude sur le Rhône valaisan. Les solutions trouvées permettent de proposer un projet d'aménagement à buts multiples capable de satisfaire aux exigences des différents acteurs tout en générant une économie d'investissement de l'ordre de 10%. Cette réduction, appelée gain synergique, est calculée par rapport à la somme des investissements

FAHRER

**einbauen
und vergessen!**

Persta Ventile Persta Schieber

Persta Rückschlagklappen

Fahrer AG
Energie-, Mess- und Regeltechnik
Alte Winterthurerstrasse 33
CH-8309 Nürensdorf

Telefon 043 266 20 40
Fax 043 266 20 41
Email info@fahrer.ch, www.fahrer.ch

optimaux des aménagements à but unique réalisés séparément. Les solutions trouvées nécessitent un investissement compris entre 150 et 180 Mio CHF. Elles permettent de produire 44 GWh/an d'électricité, de réduire le marnage actuel à 40% (calcul selon l'indicateur dont l'effet est la restauration d'un régime hydrologique quasi naturel) et offre une utilité sociale calculée à 55 000 visites annuelles. Le volume disponible pour la gestion des crues oscille entre 5 et 8 Mio m³.

Absorber plus de 80% du marnage fort (supérieur à 10 cm/h) avec une perte énergétique inférieure à 10%, justifier l'impact financier de la rétention sur les crues, optimiser le dimensionnement des machines hydroélectriques dans le cas d'une double variabilité forte (débit et chute), concevoir et dimensionner de manière intégrée des solutions qui permettent, pour des aménagements à buts multiples, des économies pour chacun des objectifs constituent les principaux résultats de ce travail de recherche.

Bibliographie

- Bollaert, E., Irniger, P., and Schleiss, A. (2000). Management of sedimentation in a multiple reservoir in a run-of-river powerplant project on an Alpine river, Proc. HYDRO 2000, Bern, Switzerland, 183–192.*
- Fourer, R., Gay, D. M., and Kernighan, B. W. (2003). AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company, USA.*
- Gomez, P., and Probst, G. (1995). Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens, Paul Haupt, 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 ju-*

*venile brown trout (*salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream, River Resources Application, 19, 589–603.*

Heller, P., Schleiss, A. J., and Bollaert, E. (2005). Potential synergies of multipurpose run-of-river hydroelectric powerplants, XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 2121–2130.

Heller, P., Bollaert, E., and Schleiss, A. (2005). Optimal reservoir use of a multipurpose run-of-river powerplant for hydropeaking mitigation, Hydro2005-Policy into Practice, Villach, Austria, 1–8.

Heller, P., Bollaert, E., Schleiss, A. J., Pellaud, M., and Schlaepfer, R. (2006). Multi-purpose shallow reservoir: Synergies between ecology and energy production, Proceedings of the Int. Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2006, Lisbon, Portugal, 2027–2035.

Heller, P. (2006). Potentiel d'Assainissement des Cours d'Eau Valaisans, logiciel PACEVs, Outil méthodologique, Rapport n°18/05 (unpublished), Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ENAC-EPFL, Lausanne, Switzerland. Larousse. (1994). Dictionnaire Le Petit Larousse Illustré, Larousse, Paris, France.

Leyland, G. (2002). Multi-objective optimisation applied to industrial energy problems, thèse n° 2572, Laboratoire d'énergétique industrielle, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Pellaud, M. (2007). Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value, thèse n° 3807, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Schleiss, A. J. (2006). Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte, Wasser Energie Luft, 98 (1), 3–9.

Notation

- C_u Coût unitaire optimal (CHF/unité)
- C_{total} Coût total de l'aménagement (CHF)

H	Niveau d'eau (m)
I_{syn}	Indicateur ou taux de synergie (-)
P	Quantité physique produite (unité)
Q	Débit (m ³ /s)
V	Volume (m ³)
	Indices et Exposant
t	temps (h)
res	réservoir
max	capacité
in	entrant
out	sortant
i	objectif de l'aménagement

Remerciements

Ce projet de recherche est financé par la Commission Fédérale pour la Technologie et l'Innovation (Switzerland, projet CTI n° 6794.1 FHS-IW) ainsi que par l'Office Fédéral de l'Environnement (Switzerland, projet Rhône-Thur, module IV, sous-module 4), l'Etat du Valais et les Forces Motrices Valaisanne. Le laboratoire de gestion des écosystèmes (EPFL, Switzerland), le bureau d'ingénieurs STUCKY et le groupe ANDRITZ-VATECH ont apporté leur soutien dans les domaines écologiques et techniques respectivement.

Adresse des auteurs

Dr. Philippe Heller
e-dric.ch, Grand-Chemin 73
CH-1066 Epalinges
Tel. +41 21 784 33 13
<http://e-dric.ch>, philippe.heller@e-dric.ch

Prof. Dr. Anton Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
CH-1015 Lausanne
Tel. +41 21 693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>, anton.schleiss@epfl.ch