

AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES FLUVIAUX A BUTS MULTIPLES

APPROCHE SYSTEMIQUE ET INTEGRATION DU MARNAGE, DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE ET DES ASPECTS SOCIAUX

MULTIPURPOSE RUN-OF-RIVER HYDROELECTRIC POWER PLANTS

SYSTEM THINKING APPROACH AND INTEGRATION OF HYDROPEAKING MITIGATION, ECOLOGY, ENERGY AND SOCIAL ASPECTS

Philippe Heller¹ et Anton Schleiss²

RESUME

La gestion des crues et la renaturation des cours d'eau alpins génèrent d'importants travaux sur ces derniers. La renaturation nécessite cependant un régime hydrologique aussi naturel que possible. En conséquence, le marnage artificiel généré par les aménagements à accumulation pour la production de l'énergie de pointe doit être supprimé. Un bassin rétention sur le cours d'eau aval permet de répondre à cette problématique. Conçu comme un aménagement à buts multiples, ce réservoir permet en outre une production locale d'énergie renouvelable, le développement d'activités de loisirs aquatiques, le laminage des crues et favorise l'intégration paysagère. La recherche de solutions pour un tel aménagement complexe débute par une étude qualitative pour comprendre le système et son environnement. Ensuite, les outils de gestion, de simulation et d'optimisation permettent de générer les solutions optimales. Le présent article présente ces outils et les solutions trouvées pour le cas d'étude sur le Rhône suisse alpin.

Mots-clés: optimisation de la gestion, modèle énergétique, modèle écologique, modèle de fréquentation, système complexe, Rhône suisse alpin supérieur

ABSTRACT

Flood protection and ecological rehabilitation of alpine river need significant river training works. In order to develop their highest ecological potential, such restoration works necessitate a near natural flow regime. Therefore, artificial hydropeaking due to peak energy production should be reduced drastically. A retention basin, directly built on the downstream river could restore a near natural flow regime. Designed as a multipurpose reservoir, such a

1 Associé, e-dric.ch Eau Energie Environnement Ingénieurs Conseils Sàrl, Grand Chemin 73, CH – 1066 Epalinges, Switzerland (Tel.: +41-21-784-3313; Fax: +41-21-784-3322; email: philippe.heller@e-dric.ch)

2 Directeur, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Station 18, EPFL, CH – 1015 Lausanne, Switzerland (Tel.: +41-21-693-2385; Fax: +41-21-693-2264; email: anton.schleiss@epfl.ch)

basin could produce local renewable energy, promote aquatic leisure activities, mitigate peak flood and help to landscape integration. Maximizing the synergies between the different purposes requires new approaches. After a qualitative analysis, management, simulation and optimisation tools allow to generate optimal solutions. This article presents these tools and the solutions reached for the considered case study on the Upper Swiss Rhone River.

Keywords: management optimisation, energetic model, ecological model, social model, complex system, Upper Swiss Rhone River

INTRODUCTION

La sensibilité croissante aux problèmes environnementaux, les changements climatiques pressentis, la proximité et la densité des infrastructures aux abords des cours d'eau nécessitent d'importants travaux sur ces derniers. Motivés par des raisons sécuritaires, ces travaux doivent aussi apporter une plus-value écologique. Par ailleurs, dans les pays développés, l'implantation de nouveaux aménagements hydrauliques est devenue difficile. De multiples contraintes font souvent obstacles à des projets intéressants mais analysés d'un seul point de vue technique ou économique. Pour répondre à cette problématique, de nombreuses méthodes participatives ont été développées (Leach & Pelkey, 2001) et permettent d'aboutir à un compromis raisonnable sur la base de projets à buts multiples (Schleiss, 2006).

Un projet à buts multiples (Figure 1, Bollaert et al., 2000) génère un système complexe avec des effets rétroactifs. Son étude doit considérer les perspectives de tous les acteurs. Les variables avec leurs rétroactions ainsi que l'environnement dans lequel le projet s'inscrit doivent être modélisés avec consistance.

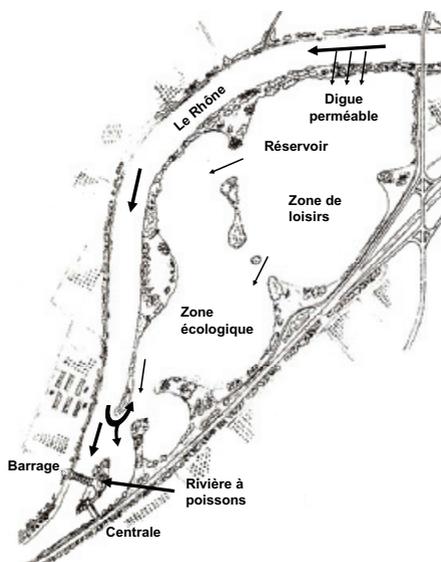


Fig 1: Intégration *in situ* d'un aménagement à buts multiples sur le Rhône suisse alpin
Fig 1: Integration *in situ* of a multipurpose project on the Upper Swiss Rhone River

La littérature suggère d'analyser les systèmes complexes par un modèle qualitatif puis un modèle quantitatif (Gomez and Probst, 1995, Coyle, 2000). Les aspects qualitatifs de la méthode appliquée aux aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples (Heller et al., 2007) définissent les principaux objectifs de l'aménagement. Ce sont le laminage du marnage, la production d'énergie, la rétention des crues, le développement de loisirs aquatiques et la stabilité du niveau d'eau du réservoir. Le présent article présente la gestion ordinaire d'un tel aménagement et ses conséquences sur les objectifs écologique, énergétique et social. Le cas d'étude est situé sur le Rhône suisse alpin supérieur (canton du Valais).

ALGORITHME DE RESOLUTION

L'étude qualitative (Heller, 2007) met en évidence la gestion comme variable pivot du système complexe. Elle constitue le lien physique entre le modèle de décision et le fonctionnement de l'aménagement. Elle intervient en dernière position dans l'ordre de la réalisation mais en première position dans l'ordre de la réflexion. La définition a priori de la gestion souhaitée du réservoir permet d'en déduire les conséquences sur les objectifs du projet. Cette réflexion est synthétisée par l'algorithme de la Figure 2.

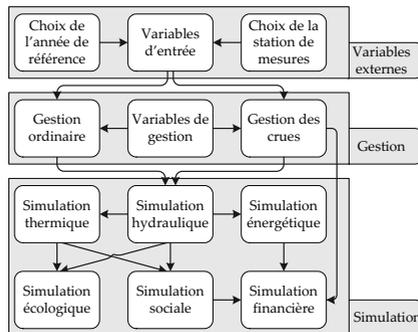


Fig 2: Modèle de gestion proposé pour un aménagement à buts multiples

Fig 2: Management model for the multipurpose reservoir

Cet algorithme est divisé en trois étapes. La première étape résume les influences externes de l'environnement (variables externes). La seconde étape détermine la gestion du réservoir à buts multiples. La troisième étape simule les conséquences sur l'aménagement et sur le cours d'eau aval. Ces modèles de simulation reprennent les principaux objectifs de l'aménagement.

MODELE DE GESTION DU RESERVOIR

Le modèle de gestion vise quatre objectifs, soit la réduction du marnage artificiel, la minimisation des oscillations dans le réservoir, la maximisation de la production d'énergie et la stabilisation du niveau estival dans le réservoir. Le premier objectif, principal pour le projet, est introduit dans le modèle mathématique par deux contraintes additionnelles sur la gestion du niveau de la rivière aval (amplitude aval A_{av} et gradient aval Δh_{av}). La fonction objective du modèle mathématique vise la maximisation du taux de remplissage du réservoir (T). Les équations 1 à 5 définissent mathématiquement le modèle de gestion proposé.

Maximise :

$$T = \sum_{t=1}^n \frac{H_{res}(t)}{H_{res,max}} \quad (1)$$

sous contraintes de :

$$h_{av}(t) \in \left[h_{moy} - \frac{A_{av}}{2}; h_{moy} + \frac{A_{av}}{2} \right], \forall t \quad (2)$$

$$|h_{av}(t) - h_{av}(t-1)| \leq \Delta h_{av}, \forall t \quad (3)$$

$$H_{res}(t) \in [H_{res,min}; H_{res,max}], \forall t \quad (4)$$

$$H_{res,min} \geq h_{av}(t), \forall t \quad (5)$$

où H_{res} représente le volume dans le réservoir au temps t , $H_{res,max}$ et $H_{res,min}$ les volumes maximal et minimal du réservoir, h_{moy} le niveau moyen visé dans le cours d'eau aval pour la période comprise entre 1 et n et h_{av} le niveau dans le cours d'eau aval au temps t . Ainsi défini, le modèle possède trois variables internes, soit le gradient aval Δh_{av} , l'amplitude aval A_{av} et l'horizon de planification n . Le modèle mathématique est résolu par le logiciel *AMPL* (Fourer et al., 2003) pour une planification de 48 heures et sur la base d'une prévision parfaite des débits. Les contraintes écologiques sur le gradient et l'amplitude possèdent chacune une valeur hivernale et une valeur estivale.

MODELE DE SIMULATION HYDRAULIQUE

Le modèle hydraulique applique l'équation de bilan au réservoir. La Figure 3 illustre la gestion optimale proposée pour une semaine hivernale type. La contrainte sur le gradient hivernal vaut 8 cm/h (Halleraker et al., 2003) et 30 cm pour l'amplitude (Meile et al., 2005).

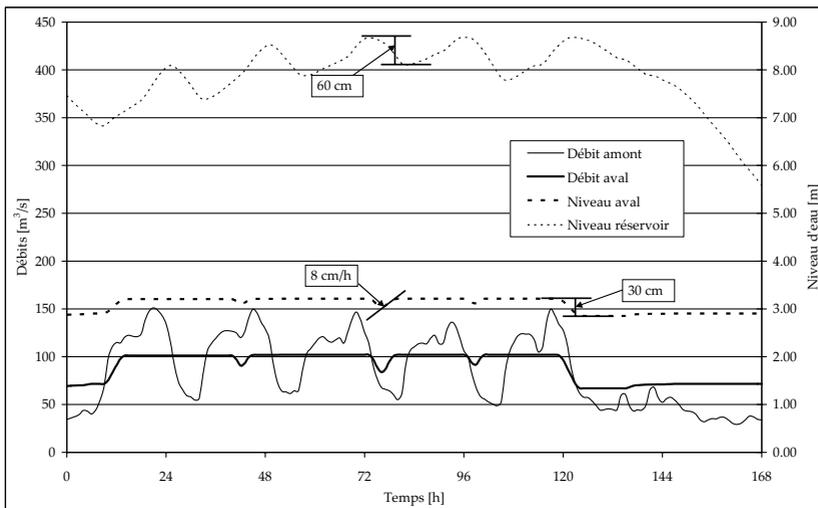


Fig 3: Débits et niveaux pour une semaine hivernale type

Fig 3: Flow and water elevation for a typical winter week

Pour la période hivernale, les conséquences de la gestion optimale sont une oscillation journalière dans le réservoir de l'ordre de 60 cm et une oscillation hebdomadaire de l'ordre de 2.50 m. En contre partie, le marnage journalier est totalement absorbé. Seule une variation hebdomadaire du débit demeure (réduction de 35 m³/s). Pendant la période estival, le réservoir est très peu sollicité et assure seulement le respect de la contrainte sur le gradient. Cette gestion est favorable pour les activités de loisirs.

L'agrégation annuelle du gain hydrologique est effectuée par la probabilité, entre deux heures successives, d'obtenir une variation du niveau d'eau égale ou inférieure à une valeur donnée (Meile et al., 2005). La Figure 4 illustre cet indicateur pour trois séries hydrologiques distinctes (référence historique, état actuel, état avec un réservoir et variation du réservoir). La stabilité du niveau, historiquement présente pendant 70% du temps, est actuellement réduite à 15%. La gestion optimale permet de rejoindre fortement la courbe historique. Le réservoir lui-même, et donc sa courbe de remous, offre une réduction des variations.

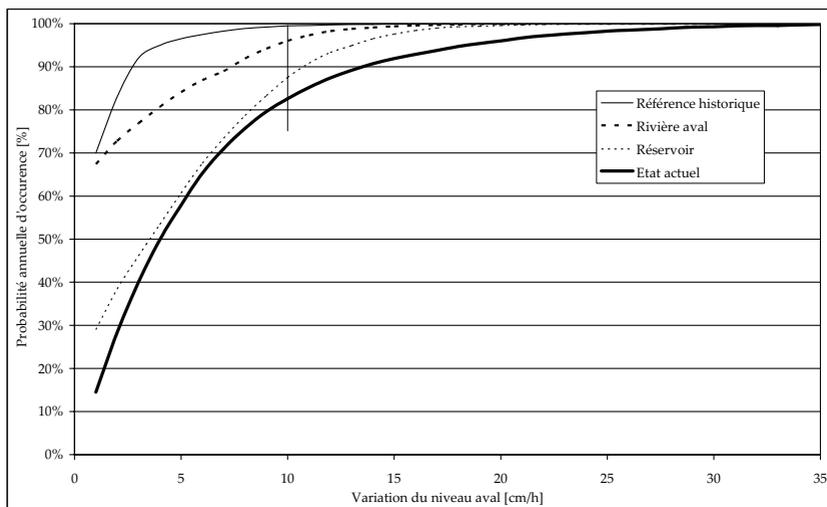


Fig 4 : Index de marnage défini comme la probabilité d'une variation de niveau entre deux heures successives
 Fig 4 : Hydropeaking index defined as the probability of a water level variation between two successive hours

MODELE DE SIMULATION ECOLOGIQUE

A cause de la différence d'échelle, le modèle d'écologie aquatique traite distinctement le réservoir et la rivière à poissons de la rivière aval. Cette dernière constitue le principal gain écologique escompté. Elle fait ainsi l'objet d'un modèle de simulation propre. Le réservoir et la rivière à poissons sont traités uniquement par des aspects constructifs basés sur l'expertise (Pellaud, 2007).

Le modèle écologique fonctionnel distingue deux modules différents pour les poissons et les invertébrés. Tous deux intègrent des données statistiques basées sur des relevés taxonomiques ainsi que l'effet de la suppression du marnage artificiel. Les différentes valeurs obtenues sont agrégées pour aboutir à une seule note représentative de la qualité écologique du cours d'eau. Pour les poissons, le modèle divise l'habitat en quatre guildes, soit les berges, les mouilles, les rapides et le cours plein (Lamouroux et al., 2002). Il calcule, pour chaque guildes, une

surface d'habitat sur la base d'un relevé statistique et l'ajuste ensuite par un modèle de logique floue (Valentin, 1995) en fonction de l'hydrologie et des modifications thermiques. Le modèle des invertébrés considère les trois taxons principaux EPT (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères). Il calcule avec des fonctions radiales (RBF) (Lek et al., 1999, Obach et al., 2001, Zhang et al., 2005) un indice standard pour prédire la richesse du cours d'eau. Un modèle de logique floue modifie alors cette richesse en fonction de la suppression du marnage (Silver, 2000, Adriaenssens et al., 2004).

MODELE DE SIMULATION ENERGETIQUE

Sur la base d'une optimisation des principaux paramètres géométriques des machines hydrauliques, le modèle énergétique résume la chaîne de transformation énergétique à un seul rendement global. L'optimisation est effectuée dans le cadre d'une forte variabilité du débit et de la charge et assure un rendement global de 85%. La puissance électrique horaire est ainsi calculée uniquement en fonction du débit et de la charge.

La gestion énergétique du réservoir qui maximise la production constitue la référence absolue. Par rapport à cette référence, la gestion optimisée génère une perte énergétique comprise entre 5 et 10% selon les valeurs des variables internes du modèle de gestion.

MODELE DE FREQUENTATION DU SITE

Le modèle de fréquentation du site calcule le nombre estival de visites liées à des activités aquatiques dans le réservoir. Il est calé sur un site existant. Sur la base d'une étude statistique régionale, la fréquentation est répartie en fonction des provenances et des activités. La transposition sur le site projeté considère ainsi la répartition de la population environnante et les activités potentielles. Des fonctions de préférence intègrent la température de l'air et de l'eau ainsi que sur les oscillations du niveau dans le réservoir.

CAS D'ETUDE

A cause de ses nombreux réservoirs à accumulation, le régime hydraulique du Rhône suisse alpin supérieur est profondément modifié (marnage journalier et report saisonnier). Les nombreux glaciers du bassin génèrent une eau fortement chargée de sédiments fins. A la suite de deux corrections, le cours d'eau est fortement canalisé sur l'intégralité de sa longueur (environ 160 km). La succession de trois crues destructrices (1987, 1993 et 2000) nécessite une troisième correction. Parallèlement à l'augmentation de la capacité, cette correction intègre des aspects de renaturation et de développement socio-économique. (Troisième Correction du Rhône, 2006).

Dans ce contexte, un aménagement à buts multiples est envisagé avec, comme principaux objectifs, le laminage du marnage, la production d'énergie, le développement d'activités de loisirs aquatique et la stabilité du niveau d'eau dans le réservoir. L'aménagement projeté possède une surface de 1 km² et une hauteur de 8.70 m (non-compris la revanche de 1 m pour les aspects sécuritaires). Le débit de la rivière à poissons est posé à 5 m³/s. Le débit équipé de la centrale hydroélectrique est admis à 200 m³/s (99^{ème} jour classé).

Etat actuel

Le site projeté possède un potentiel énergétique brut inexploité d'environ 60 GWh par année. Les berges pentues du cours d'eau ne permettent aucun contact social à l'eau. Enfin, l'intégralité du marnage artificiel demeure sur le linéaire de la rivière. Sur les 2.5 km² de la surface aval du cours d'eau, seul 10% sont utiles pour les mouilles, 2% pour les berges et moins de 1% pour les radier. La richesse prédite des macro-invertébrés donne une valeur moyenne de 4.75 taxon par type (Pellaud, 2007). Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques de l'état existant.

Tab 1 : Etat actuel du Rhône selon les indicateurs développés

Tab 1 : Current state of the Rhone River

Production d'énergie	--	GWh/an
Fréquentation aquatique du site	--	Visites/a
Longueur de berges accessibles	--	km
Mouilles	268'750	m ²
Berges	45'500	m ²
Radier	12'250	m ²
Cours plein	813'750	m ²
Richesse EPT	4.75	--

Scénario avec un aménagement à buts multiples et un cours d'eau corrigé

La correction du Rhône suisse alpin supérieur vise un élargissement du lit principal de la rivière d'environ 50% ainsi que la suppression du lit majeur. Les conséquences de l'élargissement ont un effet direct sur la production d'énergie par l'abaissement du niveau aval moyen (+23%). Avec 51.1 GWh/an, la production atteint les 86% du potentiel initial brut. Parallèlement, selon la Fig 4, le marnage est largement réduit. En conséquence, l'indice de richesse prédite des macro-invertébrés est augmenté de 380% par rapport à l'état existant et la surface utile pour les quatre guildes de poissons (indice global) de 109% (Pellaud, 2007). Compte tenu d'une augmentation de la surface totale de 50%, le gain de surface utilisable lié à l'amélioration du régime hydrologique et de la structure géomorphologique est de 59%. Le nombre de visites pour les loisirs aquatiques sur le site dépasse les 50'000 unités par année. Le linéaire du Rhône profite également d'un contact à l'eau possible (fréquentation additionnelle non considérée). Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques d'un aménagement à buts multiples et d'un élargissement du lit.

Tab 2 : Etat potentiel du Rhône avec un aménagement à buts multiples et un cours d'eau élargi

Tab 2 : Potential state of the Rhone River with a multipurpose reservoir and a bed widening

Production d'énergie	51.1	GWh/an	--
Fréquentation aquatique du site	53'500	Visites/an	--
Longueur de berges accessibles	~ 40	km	--
Mouilles	552'000	m ²	+ 105%
Berges	363'000	m ²	+ 695%
Radier	136'900	m ²	+ 1010%
Cours plein	1'334'000	m ²	+ 65%
Richesse EPT	22.70	--	+ 380%

CONCLUSIONS

Pour la gestion des crues, des travaux importants de corrections sur les cours d'eau sont nécessaires. La législation suisse oblige, pour ces travaux, l'intégration de la dimension écologique. Les mesures préconisées sont un élargissement du cours d'eau, et un aplatissage des berges. Dans cette configuration, le régime hydrologique devient le facteur limitant pour la renaturation écologique. Il est ainsi nécessaire de réduire la variabilité artificielle du régime et de reproduire un hydrogramme aussi naturel que possible. Cet objectif peut être facilement atteint avec un réservoir à buts multiples géré activement sur le cours d'eau.

Avec la nécessité d'un réservoir géré activement, la production locale d'énergie renouvelable s'inscrit naturellement dans le projet. Le modèle de gestion optimisée montre clairement le potentiel de réunion de deux objectifs apparemment antagoniste (énergie et écologie). Moyennant une légère perte énergétique, une hydrologie quasi naturelle peut être restaurée. Les principaux gagnants de cette nouvelle situation sont les macro-invertébrés avec une croissance calculée de près de 400%.

Compte tenu des faibles exigences liées aux loisirs aquatique, cet objectif peut être facilement inclus. La stabilité souhaitée du niveau d'eau dans le réservoir concorde avec la production énergétique et l'intégration paysagère.

La considération des processus physiques liés à un réservoir permet de développer un algorithme simple de simulation de l'aménagement et d'en chiffrer, par des indicateurs corrélés, les conséquences attendues. Des solutions de compromis sont ainsi faciles à développer. La compréhension du système et de son fonctionnement lié à la puissance du calcul informatique permettent ainsi de développer les meilleures solutions multi-objectives pour un aménagement hydraulique complexe.

REMERCIEMENTS

Le projet SYNERGIE 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.

REFERENCES

- Adriaenssens V., de Baets B., Goethals P.L.M., de Pauw N. (2004): "Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management." *The Science of the Total Environment*, Vol 319; 1-12.
- Bollaert E., Imiger P., 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, 183-192.
- Coyle G. (2000): "Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions." *System Dynamics Review*, Vol. 16; 225-244.
- Fourer R., Gay D. M., Kernighan B. W. (2003): "AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming." Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company, USA.

- Gomez P., Probst G. (1995): "Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens." Paul Haupt Verlag, Bern, Switzerland.
- Halleraker J.H., Saltveit S.J., Harby A., Arnekleiv J.V., Fjeldst H.-P., 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; 589-603.
- Heller P. (2007): "Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples par une analyse systémique." thèse de doctorat n° 3781, Communication n° 30, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 282 pp.
- Heller P., Bollaert E., Schleiss A. (2007): "Comprehensive study of a multi-purpose run-of-river power plant with a holistic qualitative analysis." *Journal of River Basin Management*, (submitted).
- Lamouroux N., Souchon Y. (2002): "Simple predictions of in-stream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams." *Freshwater Biology*, Vol. 47; 1531-1542.
- Leach W. D., Pelkey N. W. (2001): "Making Watershed Partnerships Work: A Review of the Empirical Literature." *J. Water Resour. Plng. Mgmt.*, Vol. 127(6); 378-385.
- Lek S., Guegan J.F. (1999): "Artificial Neural Networks as a tool in ecological modeling, an introduction." *Ecol. Model.*, Vol. 90; 39-52.
- Meile T., Schleiss A., Boillat J.-L. (2005): "Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts." *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, Vol. 97(5/6); 133-142.
- Obach M., Wagner R. and al. (2001): "Modelling population dynamics of aquatic insects with artificial neural networks." *Ecological Modelling*, Vol. 146; 207-217.
- Pellaud M. (2007): "Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value." thèse de doctorat n° 3807, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Silvert W. (2000): "Fuzzy indices of environmental conditions." *Ecological Modelling*, Vol. 130; 111-119.
- Schleiss A. (2006): "Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte." *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, Vol. 98(1); 3-9.
- Troisième Correction du Rhône (2006): "Plan sectoriel 3ème Correction du Rhône." Etat du Valais, Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, Service des Routes et Cours d'Eau, Projet Rhône, Valais, Switzerland.
- Valentin S. (1995): "Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques: effets écologiques des écluées hydroélectriques en rivière." Laboratoire Hydroécologie Quantitative - Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques - CEMAGREF. Lyon, Université Claude Bernard - Lyon I, pp. 263.
- Zhang L., Gove J.H., Heath L.S. (2005): "Spatial residual analysis of six modeling techniques." *Ecological Modelling*, Vol. 86; 154-177.