

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

Philippe Heller

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 Freizeitzone 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 Variablengruppen 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 Freizeitzone 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'eaux. 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 limiter 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

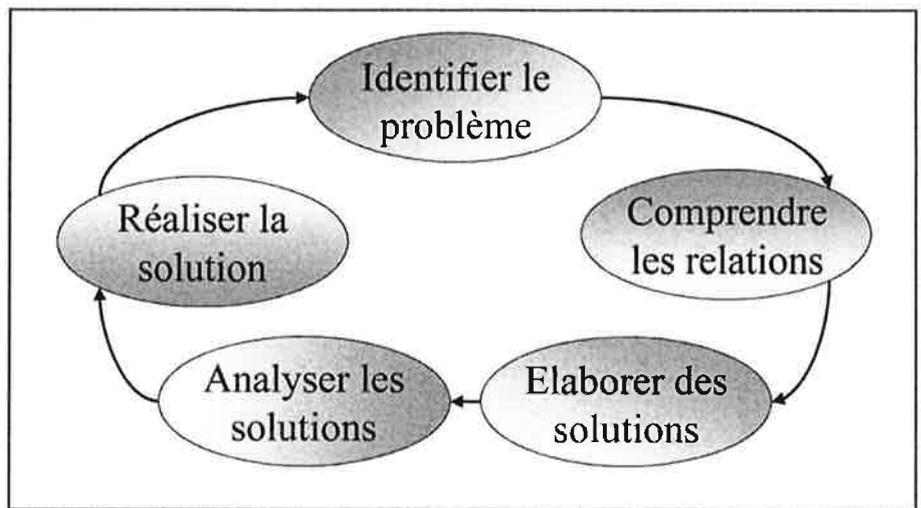


Figure 1. Les cinq étapes de la méthode de Probst et Gomez.

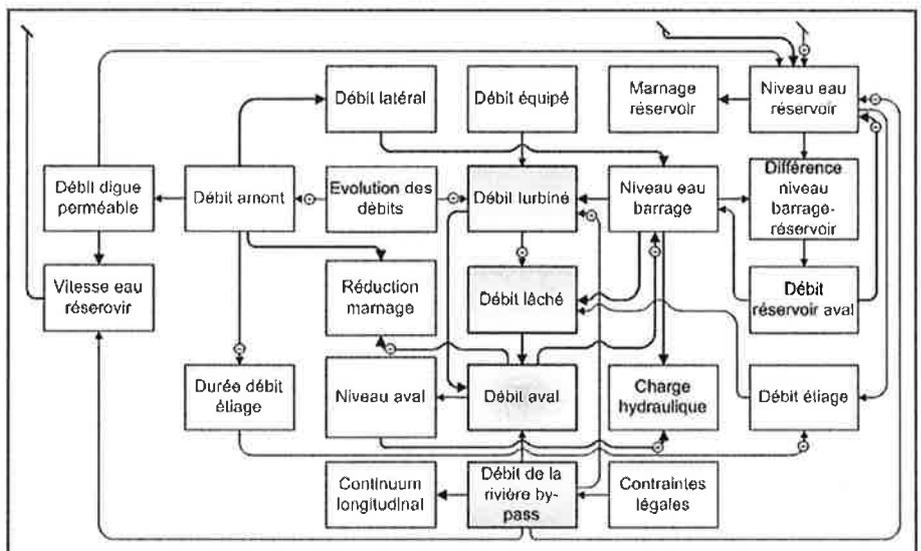


Figure 2. Diagramme d'influence; exemple du réseau hydraulique partiel; le débit de la rivière by-pass, le débit turbiné et le débit lâché influencent directement le débit aval.

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

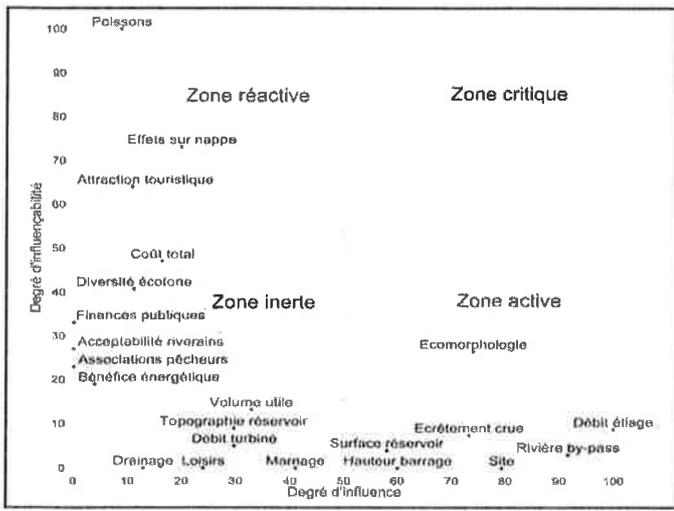


Figure 3. Répartition graphique des quatre zones; représentation des variables de taille, de gestion et d'objectif les plus importantes.

leur capacité réactive (leur capacité à être influencé par les autres variables). Le graphe est divisé en quatre parties. La zone inactive 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» (OFEG, 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.

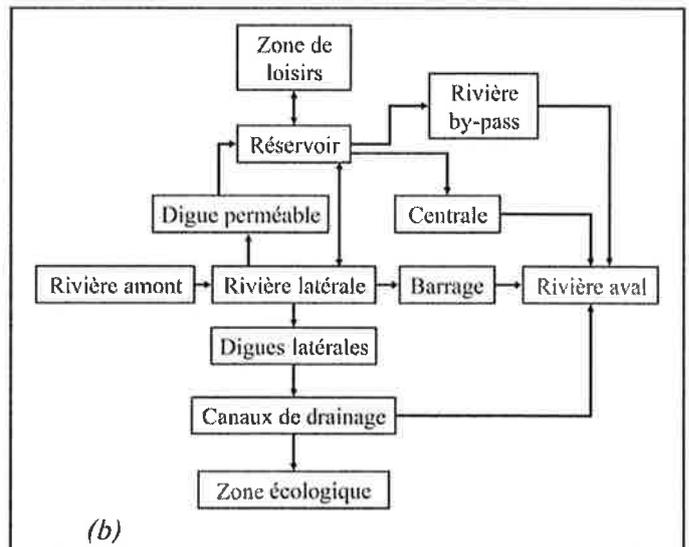
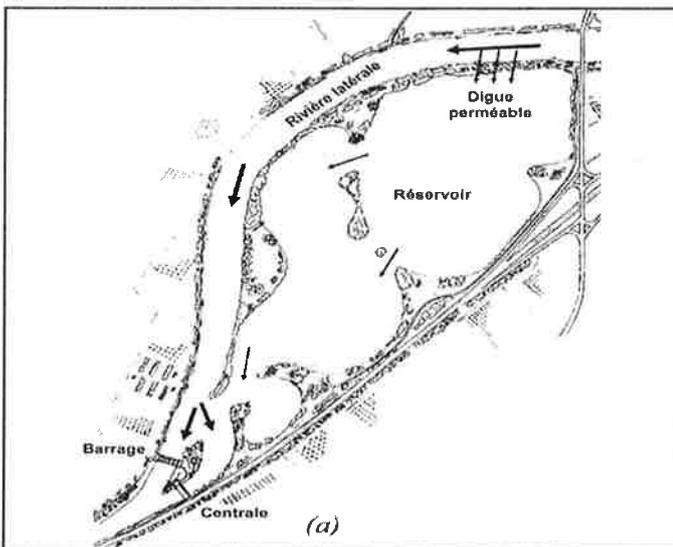


Figure 4. Configuration d'un projet à buts multiples; (a) in situ; (b) conceptuel.

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 successive en cm/h). Une

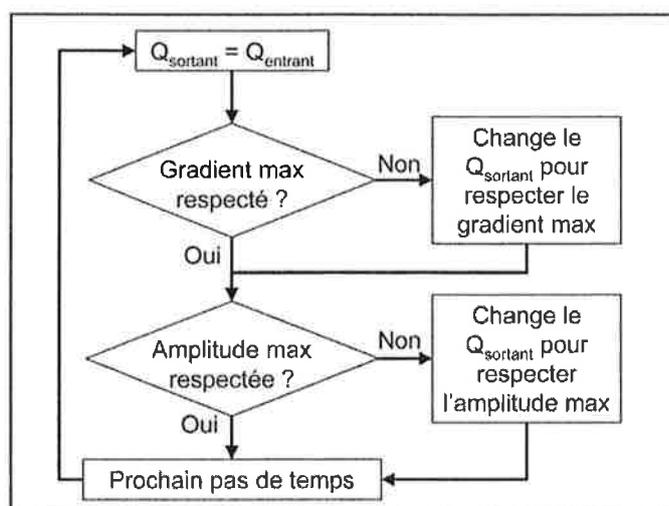


Figure 5. Algorithme a priori.

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 hivernale 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 réso-

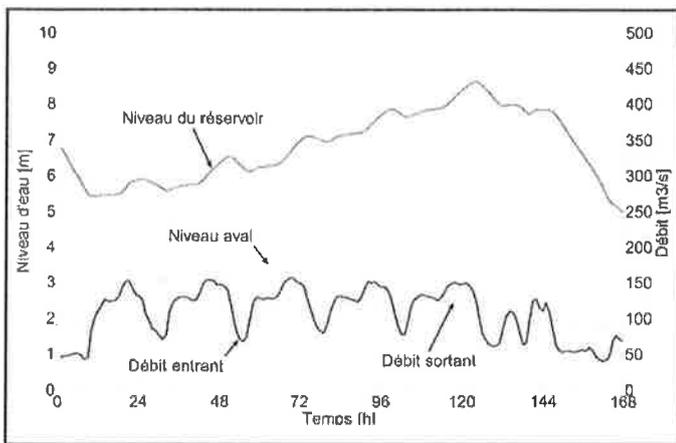


Figure 6. Régulation hebdomadaire hivernale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation a priori.

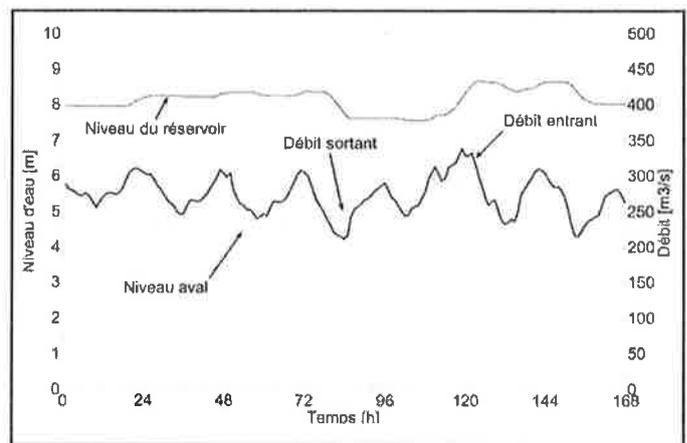


Figure 7. Régulation hebdomadaire estivale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation a priori.

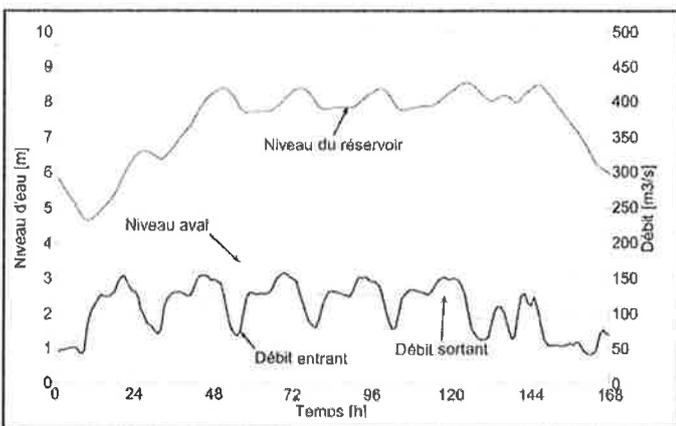


Figure 8. Régulation hebdomadaire hivernale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation a posteriori, troisième fonction.

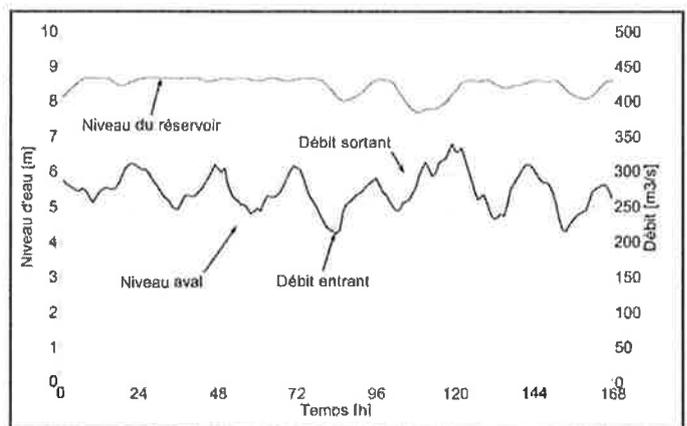


Figure 9. Régulation hebdomadaire estivale du réservoir et de la rivière aval avec 30 cm d'amplitude et 8 cm/h de gradient, régulation a posteriori, troisième fonction.

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 relaxées 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-

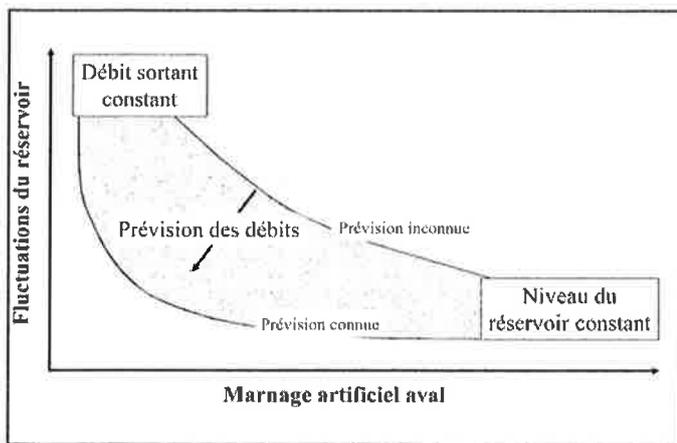


Figure 10. Courbes conceptuelles des solutions de Pareto selon le degré de prévision.

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 définit 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., Irriger, 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/eurodicautom/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 Abflussregimes der Rhone 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'ingénieur Stucky et VA Tech apporte 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