

4. Présent et futur des prévisions hydrologiques pour la gestion des crues. Le cas du Rhône alpin.

par

Javier GARCÍA HERNÁNDEZ¹, Jean-Louis BOILLAT²
Isabelle FELLER² & Anton J. SCHLEISS²

Résumé.—GARCÍA HERNÁNDEZ J., BOILLAT J.-L., FELLER I. & SCHLEISS A. J., 2013. Présent et futur des prévisions hydrologiques pour la gestion des crues. Le cas du Rhône alpin. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 55-70.

L'objectif prioritaire du projet de la 3^{ème} Correction du Rhône en amont du Léman est d'assurer la protection de la plaine lors des crues. Dans ce contexte, le projet MINERVE poursuit le but de prévoir et d'optimiser la gestion des flux hydrauliques, en profitant des prévisions hydrologiques et du réseau d'aménagements hydroélectriques existant sur le bassin versant. Pour ce faire, un modèle de prévisions hydro-météorologiques et un modèle d'aide à la décision pour l'exploitation préventive des aménagements hydroélectriques ont été développés. Dans un premier temps, le modèle fonctionnait de manière déterministe, en utilisant les prévisions météorologiques COSMO-7 de MétéoSuisse. Par la suite, le projet s'est élargi en considérant les prévisions probabilistes COSMO-LEPS et en intégrant la notion d'incertitude hydro-météorologique dans le processus de décision.

Mots clés: Modélisation hydrologique, prévision de crues, gestion d'aménagements hydroélectriques.

Abstract.—GARCÍA HERNÁNDEZ J., BOILLAT J.-L., FELLER I. & SCHLEISS A. J., 2013. Present and future of hydrological forecasts for flood management. The case of the Alpine Rhone. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 55-70.

The first objective of the Third Rhone Correction upstream of Lake Geneva is to ensure the plain protection during floods. In this framework, the MINERVE project aims to predict and optimise the management of flows, taking profit of the hydrological forecasts and hydropower plants network. A model for hydro-meteorological forecasts and a decision support system for preventive management of the hydropower plants have thus been developed. In a first step, the model was deterministic, based on meteorological forecasts COSMO-7 from MeteoSwiss. Afterwards, the project has been enlarged, also considering the probabilistic forecasts COSMO-LEPS and integrating the hydro-meteorological uncertainty into the decision making process.

Keywords: Hydrological modelling, flood forecast, hydropower plants management.

¹Pôle GestCrues, Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), rue de l'Industrie 45, CH-1951 Sion, Suisse; tél.: +41 (0)27 607 11 88.

E-mail: javier.garcia@crealp.vs.ch

²Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL-ENAC-IIC-LCH, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse.

INTRODUCTION

Le bassin versant du Rhône alpin, en amont du lac Léman, couvre une surface de 5520 km² (figure 1). Il est caractérisé par la présence de nombreux aménagements hydroélectriques dont le débit équipé total est de 350 m³/s environ. Les plus importants sont dotés de bassins d'accumulation, avec un volume de rétention total supérieur à 1195 Mio m³.

Les crues de 1987, 1993, 2000, 2002 et 2005 ont rappelé l'importance de la prévision et de la gestion du risque d'inondation lors d'événements exceptionnels, susceptibles d'occasionner des dommages importants consécutifs au débordement des cours d'eau et des bassins d'accumulation. Ces événements ont aussi démontré que la capacité de rétention et de régulation des grands barrages est capable de laminer significativement les crues sur l'ensemble du réseau hydrographique, à condition de pouvoir s'appuyer sur une interprétation adéquate des prévisions hydro-météorologiques.

Le projet MINERVE (BOILLAT 2005, 2009) poursuit les objectifs de déclenchement d'alertes et de gestion préventive des crues. Il s'appuie sur un outil de simulation hydrologique basé sur les prévisions météorologiques et sur un modèle d'aide à la décision qui propose des scénarios de turbinage et de vidange préventive pour amplifier l'effet de laminage des retenues. Les résultats de simulation fournissent les informations utiles à la décision et à la coordination des actions à entreprendre en cas de catastrophe annoncée.

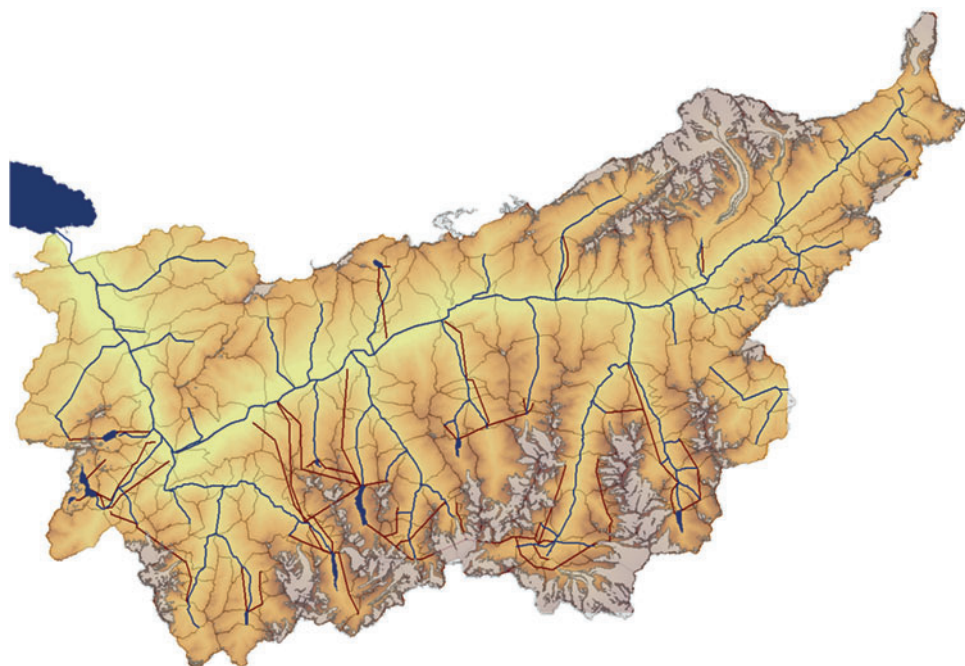


Figure 1.—Le bassin versant du Rhône alpin avec son réseau naturel de drainage et ses principales retenues de barrages.

L'APPROCHE DÉTERMINISTE

Dès l'origine du projet MINERVE, au début des années 2000, un modèle hydrologique a été développé pour transformer les prévisions météorologiques en débits. Ce modèle conceptuel, décrit ci-après, est développé à l'aide du logiciel de simulation hydrologique et hydraulique appelé Routing System (DUBOIS & BOILLAT 2000, GARCIA HERNANDEZ *et al.* 2007). Ce dernier est conçu pour simuler la formation et la propagation des écoulements dans des systèmes à surface libre. Il permet la prise en compte des processus hydrologiques, le routage dans les retenues et les cours d'eau ainsi que la modélisation d'ouvrages régulés tels que vannes, évacuateurs réglables, prises d'eau, turbines ou pompes.

Le modèle global du bassin versant du Rhône en amont du Léman est ainsi capable d'établir la prévision de crues en s'appuyant sur les prévisions météorologiques (JORDAN *et al.* 2008). Le suivi en temps réel des écoulements peut également être fait sur la base des mesures enregistrées aux stations de mesure existantes.

Le modèle hydrologique

Le bassin versant du Rhône a été discrétisé en 239 sous-bassins versants d'une surface moyenne de 23 km², de manière à tenir compte des nombreux ouvrages de captage situés en altitude. Le concept du modèle hydrologique, développé pour quantifier les apports de chaque sous-bassin (HAMDI *et al.* 2005), se base sur les modèles Socont (BEROD 1994) et GSM-Socont (SCHAEFLI *et al.* 2005, HINGRAY *et al.* 2006). La propagation des flux dans le réseau hydrographique est ensuite effectuée avec un modèle d'onde cinématique.

Pour la modélisation hydrologique, les sous-bassins versants sont divisés en régions glaciaires et non glaciaires, elles-mêmes découpées en bandes d'altitude. Dans chaque bande, un modèle de neige, composé d'un double réservoir (neige et eau liquide contenue dans la couche de neige), suit l'évolution temporelle de la couverture neigeuse et son degré de saturation. Les précipitations et températures horaires sont ajustées et appliquées individuellement à chaque bande d'altitude. La précipitation est interpolée au centre de gravité de la bande à partir des stations météorologiques voisines (ou à partir des points de grille d'une prévision météorologique), avec une pondération qui tient compte des distances respectives. La température est calculée en considérant un gradient constant à partir de la température de l'air au sol. La fonte de neige est ensuite calculée selon une formule de type degré-jour, pour produire une pluie équivalente à partir d'un taux de saturation seuil.

Dans la bande glaciaire (figure 2), la pluie équivalente résultant de la fonte de neige est transférée à l'exutoire par un réservoir linéaire. Lorsqu'il n'y a plus de neige sur la couverture glaciaire, un modèle de fonte de glace de type degré-jour produit un débit qui est également transféré à l'exutoire par un réservoir linéaire.

Dans la bande non glaciaire (figure 3), la pluie équivalente alimente le modèle d'infiltration et de ruissellement de surface. Celui-ci est composé de deux réservoirs non-linéaires parallèles, produisant respectivement les composantes lente et rapide de l'écoulement à l'exutoire du sous-bassin.

Le débit total du sous-bassin versant est ainsi la somme des diverses contributions de chaque bande d'altitude.

AUTRES DANGERS

Glissements de terrains

22. Analyses géo-mécaniques des glissements de terrain superficiels 279
John Eichenberger, Alessio Ferrari & Lyesse Laloui
23. Assainissement du glissement de La Saussaz: état de stabilité 10 ans après les travaux 295
Jean-François Brodbeck & Renaud Marcelpoix

Aléas sismiques et volcaniques

24. Evaluation des effets de site sismiques dans le canton de Genève – Etat des lieux 303
Corine Frischknecht, Sandra Hurter, Olivier Kaufmann & Azarm Farzam
25. Approche expérimental dans la compréhension des dangers liés aux éruptions volcaniques 311
Irene Manzella, Laura Pioli, Gholamhossein Bagheri, Hélène Monnard, Jeremy Phillips & Costanza Bonadonna

MÉTHODES

26. Exploitation d'archives de données satellitaires de radar à synthèse d'ouverture (SAR) pour la cartographie et la surveillance de glissements de terrain au niveau régional et à l'échelle locale 321
Alessandro Ferretti, Andrea Tamburini, Marco Bianchi, Massimo Broccolato & Davide Carlo Guido Martelli
27. Application de la sismique hybride dans les sous-sols instables 331
Philippe Corboz & Walter Frei
28. Corrélation multi-dates de données de scanner laser terrestre pour la caractérisation de la cinématique de glissements de terrain 341
Julien Travelletti, Jean-Philippe Malet & Christophe Delacourt

GESTION DES RISQUES LIÉS AUX DANGERS NATURELS

29. Avancement du projet de réalisation des cartes de dangers naturels et de leur transcription dans l'aménagement du territoire, canton de Vaud 355
Nadia Christinet, Christian Gerber & Claire-Anne Dvorak
30. Un défi des gestionnaires de territoire: comment composer avec les différentes définitions des risques? 363
Manuela Fernandez, Jean Ruegg & Gilles Brocard
31. Dangers naturels dans une commune de montagne, Ormont-Dessus 375
Michel Jaboyedoff & Marc-Henri Derron

POSTFACE

32. Postface: La gestion des risques naturels est une dynamique 393
Michel Jaboyedoff, Marie Charrière, Marc-Henri Derron, Pierrick Nicolet & Karen Sudmeier-Rieux

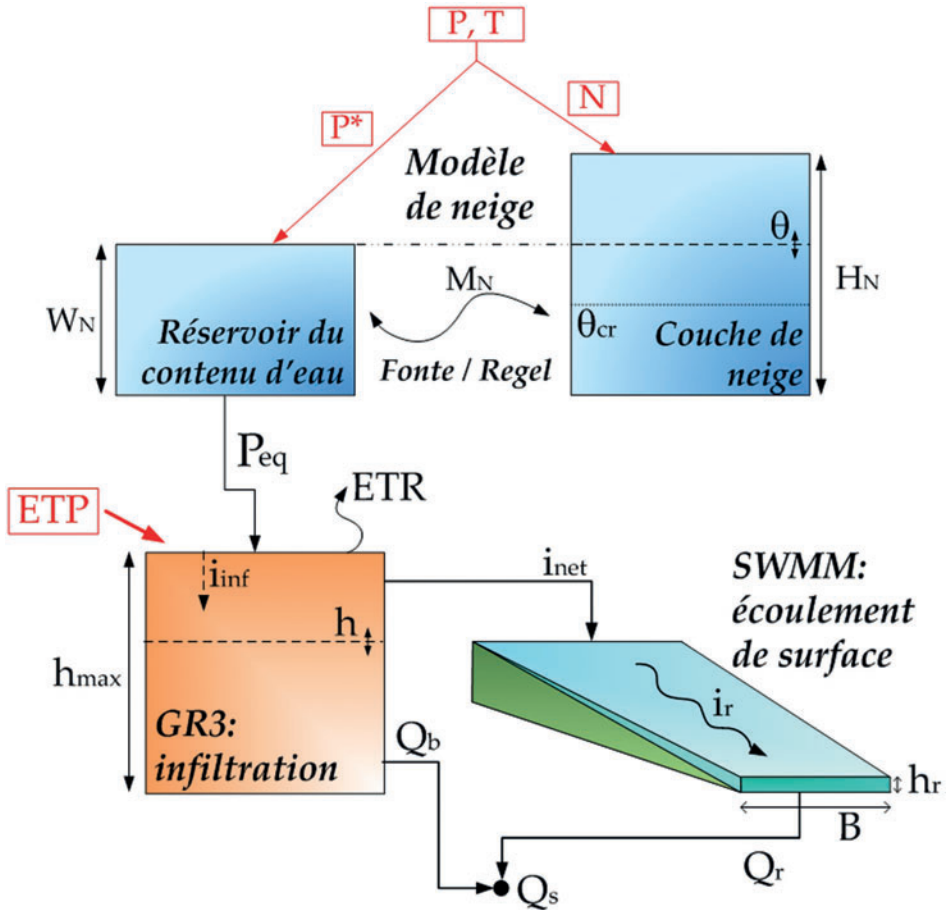


Figure 3.—Modèle hydrologique de la partie non-glaciaire. Données d'entrée: précipitation (P), température (T) et évapotranspiration potentielle (ETP). Données de sortie: débit de base (Q_b), débit de ruissellement (Q_r), débit total (Q_s) et évapotranspiration réelle (ETR). P^* représente la précipitation liquide, N la précipitation solide, H_N la hauteur de neige, W_N la hauteur d'eau, θ le contenu relatif d'eau dans le stock de neige, θ_{cr} le contenu d'eau dans le stock de neige à partir duquel la précipitation équivalente est produite, M_N la fonte ou congélation de la neige, P_{eq} la précipitation équivalente provenant de la fonte de neige, h_{max} la capacité d'infiltration du réservoir-sol, i_{inf} l'intensité d'infiltration, i_{net} l'intensité de pluie nette, h la hauteur d'eau dans le réservoir-sol, h_r la hauteur d'eau à l'aval de la surface de ruissellement, B la largeur du plan de ruissellement et i_r l'intensité de ruissellement.

de stockage dans les retenues et à interrompre les opérations de turbinage et/ou de vidange durant la pointe de crue. Le deuxième consiste à optimiser la reconstitution des stocks à la fin de la crue, de façon à éviter les pertes d'eau dans les réservoirs.

Le fonctionnement de ce Système Expert est théoriquement simple. Les hydrogrammes prévus aux points de contrôle du réseau hydrologique sont utilisés en entrée du modèle d'optimisation. Ce dernier tient compte également des niveaux de retenues ainsi que de

l'état de fonctionnement des différents ouvrages (turbines, pompes, vidanges de fond). A partir de ces données, le modèle d'optimisation calcule le programme des opérations de turbinage et/ou d'ouverture des organes de vidange, permettant de contrôler au mieux le débit des cours d'eau en aval. A la fin de cette procédure, les opérations préventives proposées par le modèle sont applicables jusqu'à la prochaine prévision météorologique ou jusqu'à la prochaine mise à jour du modèle hydrologique.

LE CONCEPT PROBABILISTE

L'approche déterministe produit des résultats satisfaisants. Toutefois, de nouveaux développements ont été réalisés pour améliorer la fiabilité du système et faciliter la décision lors d'événements de crue (GARCIA HERNANDEZ *et al.* 2009a, GARCIA HERNANDEZ 2011a). Les prévisions d'ensemble et les prévisions d'adaptation statistique (HORTON *et al.* 2011) ont été introduites au projet dans le but d'obtenir un système plus robuste et fiable, intégrant le concept d'incertitude hydro-météorologique dans la décision (GARCIA HERNANDEZ *et al.* 2009b). Parallèlement, le modèle hydrologique et la répartition spatiale des précipitations et des températures ont fait l'objet d'une amélioration conceptuelle (TOBIN *et al.* 2011).

L'apport de COSMO-LEPS

Une prévision déterministe est susceptible de bercer l'utilisateur d'une illusion de certitude qui peut facilement aboutir à une action sous-optimale (CHEN & YU 2007). Quand bien même de nombreuses améliorations ont été apportées à la prévision hydrologique déterministe, particulièrement à court terme, sa performance n'est pas toujours suffisante pour une application à la gestion du risque lors de fortes précipitations.

Les prévisions météorologiques COSMO-LEPS, établies par MétéoSuisse, ont ainsi été incorporées au projet. Elles permettent de combiner les avantages de l'approche probabiliste avec la haute résolution du modèle numérique (MARSIGLI *et al.* 2005). Le but de COSMO-LEPS est l'amélioration des prévisions d'événements extrêmes localisés à court et moyen terme, en particulier quand les processus liés à l'orographie et au contexte atmosphérique régional jouent un rôle crucial (MARSIGLI *et al.* 2008).

Ces prévisions apportent une information complémentaire avec certains avantages potentiels. Elles permettent notamment une évaluation de l'incertitude associée aux événements annoncés. Celle-ci peut ensuite être utilisée pour décider le déclenchement d'une alerte « eau » ou une action de gestion préventive des aménagements, en s'appuyant sur la prise en compte d'un risque probabiliste.

Le bulletin d'avertissements

Le bulletin d'avertissements de MINERVE (figure 4) montre de manière synthétique et intuitive l'évolution de la situation hydrologique aux différents points de contrôle du bassin versant et fournit des messages d'avertissement (avis, alerte ou alarme) en fonction de différents seuils de dépassement de débit (Service de la Sécurité Civile et Militaire 2009) et de la probabilité des prévisions d'ensemble. Les points de contrôle choisis sont répartis sur

le cours principal du Rhône (Reckingen, Brig, Steg, Sierre, Sion, Branson, Lavey et Porte du Scex) et ses deux affluents principaux (Vispa et Dranse).

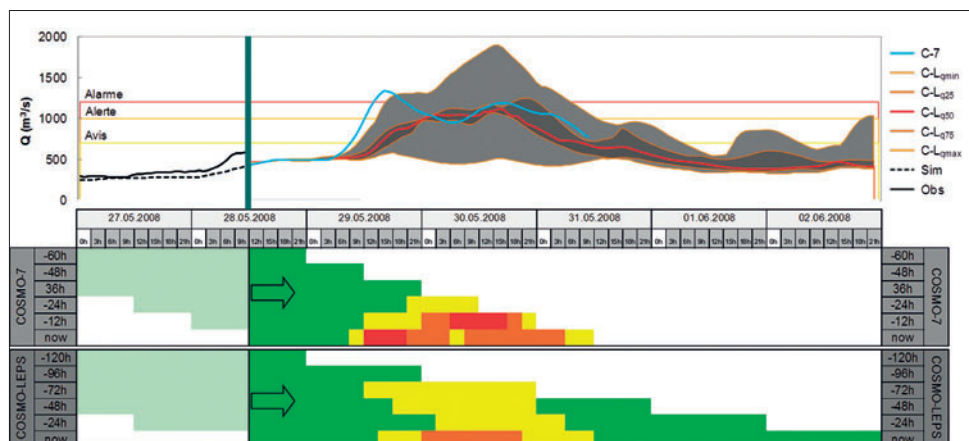


Figure 4.—Bulletin d'avertissement de crue MINERVE à la Porte du Scex. Les couleurs de cellule représentent le niveau de danger: vert si aucun danger n'est prévu et jaune, orange et rouge pour les différents seuils de danger consécutifs. C-7 représente la simulation de débit réalisée à partir de la prévision COSMO-7. Concernant la simulation obtenue à partir de la prévision COSMO-LEPS, $C-L_{q25}$ et $C-L_{q75}$ représentent le premier et le troisième quartile, $C-L_{q50}$ la médiane, et $C-L_{qmin}$ et $C-L_{qmax}$ les valeurs minimales et maximales. Sim représente la simulation hydrologique réalisée à partir des mesures météorologiques et Obs le débit observé.

Le système d'aide à la décision

L'analyse de risque permet d'évaluer la rationalité d'une décision, ce qui est particulièrement important pour des prévisions hydro-météorologiques chargées d'incertitude. L'évaluation du risque est ainsi nécessaire préalablement à une décision. Cette dernière peut s'appuyer sur un système d'aide, conçu pour l'évaluation de différents scénarios dépendant de valeurs estimées. Cette approche conceptuelle est indispensable à l'optimisation de réseaux complexes à objectifs multiples, tel qu'un ensemble de réservoirs dédiés à la production d'électricité, à l'approvisionnement en eau et au contrôle des crues. L'outil MINDS (MINERVE Interactive Decision Support), a ainsi été développé pour l'évaluation des scénarios de crue, en faisant évoluer le précédent Système Expert vers une approche probabiliste.

L'utilisation des aménagements hydroélectriques pour le contrôle des crues est une opération délicate. Si l'objectif prioritaire du décideur est de limiter le débit de pointe dans les cours d'eau, il doit cependant aussi considérer l'économie des moyens. Il s'agit en fait de limiter les pertes économiques liées aux opérations préventives lors des crues, sachant que les prévisions sont entachées d'incertitude, en particulier pour ce qui concerne les précipitations. Les prévisions d'ensemble COSMO-LEPS permettent désormais d'évaluer partiellement cette incertitude.

MINDS: MINERVE INTERACTIVE DECISION SUPPORT SYSTEM VUE D'ENSEMBLE

Le principal objectif de MINDS (figure 5) est la minimisation de tous les dommages causés par les inondations, et cela, en tenant compte des éventuelles pertes de production d'énergie des aménagements hydroélectriques dues aux opérations préventives.

Un modèle de transfert hydraulique a été spécialement réalisé pour ce bassin complexe du Rhône alpin (figure 6). Il comprend 21 réservoirs et 24 centrales hydroélectriques qui sont connectés selon leurs liens topologiques pour constituer 10 groupes hydroélectriques gérés de façon indépendante.

Le bassin d'étude ainsi que les aménagements à optimiser sont choisis par l'utilisateur. Le choix s'adresse généralement à la totalité du bassin versant, avec la Porte du Scex comme exutoire, pour en optimiser l'ensemble des aménagements hydroélectriques.

Principes de l'optimisation

Une fois que le bassin et les aménagements hydroélectriques à optimiser sont définis, la fonction objective recherche les séquences optimales de turbinage, vidange et pompage pour réduire, en situation de crue, le débit au Rhône et ses affluents. Si aucun dommage n'est perceptible, le système propose de suivre les consignes d'opérations usuelles présumées (ou connues) des aménagements. Dans le cas contraire, des opérations préventives sont proposées. Les pertes de production énergétique associées aux mesures préventives imposent simultanément une maximisation des volumes de stockage dans les réservoirs sur la période d'optimisation. Les mesures préventives ne sont alors définies que si elles ont un effet sur les dommages potentiels et sont limitées à la durée strictement nécessaire.

Dans ce système, les données d'entrée sont les hydrogrammes aux points de contrôle du réseau ainsi que les apports d'eau et les niveaux initiaux des réservoirs. Toutes ces données résultent des prévisions hydrologiques calculées par Routing System MINERVE à partir des prévisions déterministes COSMO-7 et probabilistes COSMO-LEPS. Si la prévision probabiliste est utilisée, le poids de chaque membre de la prévision est pris en compte et des méthodes de prise de décision multicritère sont proposées (GARCIA HERNANDEZ 2011a).

Les contraintes du système concernent la capacité des turbines et des pompes dans les centrales hydroélectriques, la capacité des vidanges intermédiaires et de fond, le bilan des volumes d'eau et de stockage, les procédures d'urgence et les caractéristiques des déversoirs de trop-plein ainsi que le débit de débordement aux points de contrôle. D'éventuelles contraintes ponctuelles, comme des turbines hors service ou des niveaux de débordements inférieurs dus à des travaux, peuvent être facilement introduites par l'utilisateur avant la phase d'optimisation.

L'optimisation des mesures préventives est effectuée par différents algorithmes. L'algorithme Greedy (DECHTER & DECHTER 1989) optimise les groupes hydroélectriques en série, groupe par groupe. Le processus est répété de façon itérative en prenant comme état initial la solution de l'itération précédente et cela, jusqu'à la convergence du résultat. Pour chaque groupe, l'optimisation consiste en une minimisation du risque basé sur les dommages et les pertes d'exploitation. Alternativement, l'algorithme évolutif SCE-UA

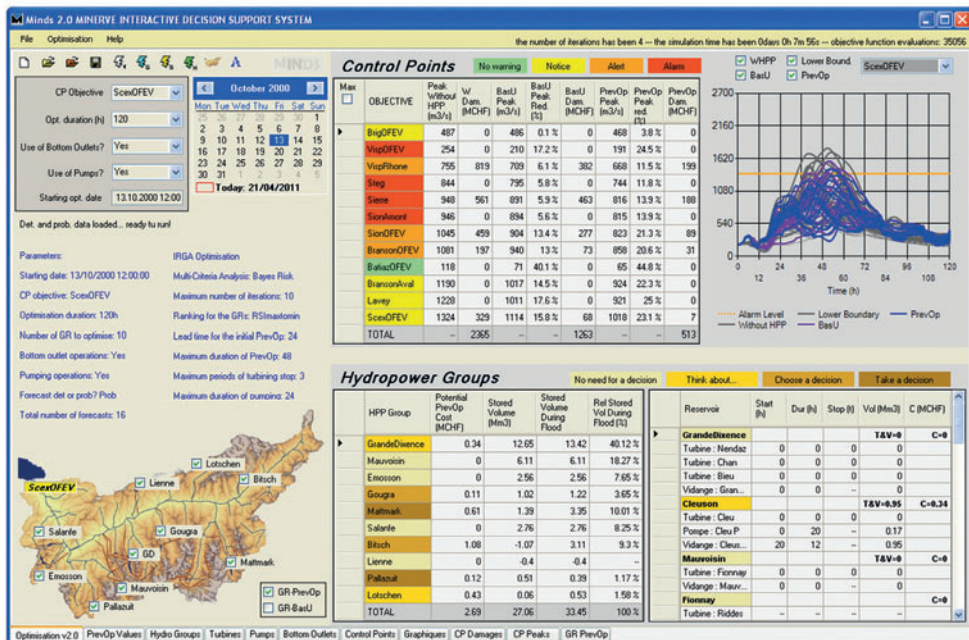


Figure 5.– Interface de MINDS après un calcul d'optimisation.

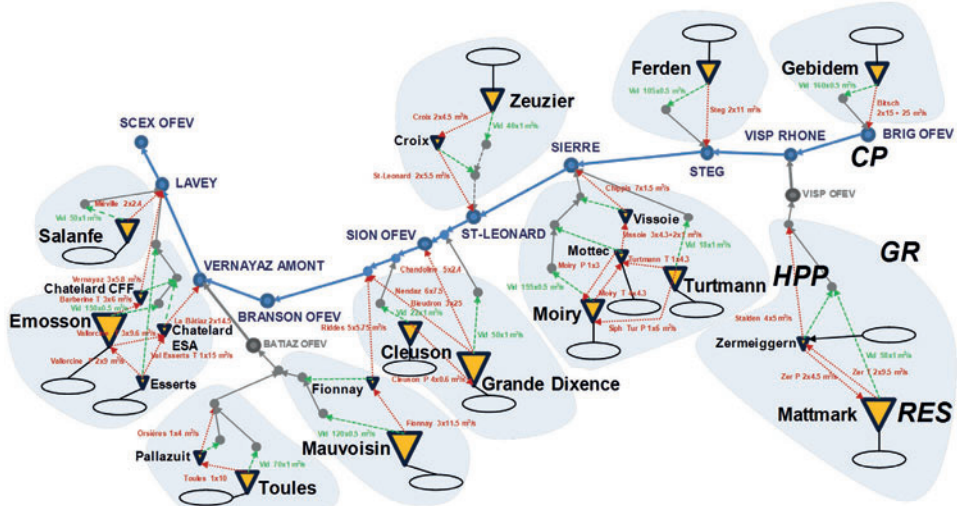


Figure 6.–Schéma du modèle MINDS avec le système hydraulique complexe et ses éléments: les réservoirs RES, les systèmes de vidange VID de fond (lignes traits-tillés) et les déversoirs, les centrales hydroélectriques de turbinage et pompage (lignes pointillées), le réseau principal et les points de contrôle (CP).

(DUAN *et al.* 1992, 1993) propose une méthode globale pour optimiser les opérations préventives des tous les aménagements simultanément.

Les résultats fournis par MINDS sont, entre autres, les hydrogrammes aux points de contrôle et les montants des dommages dus aux débordements et aux possibles pertes d'exploitation. Pour la bonne compréhension de la situation, trois scénarios sont présentés: celui du bassin naturel (cas théorique sans aménagements hydroélectriques), celui avec les opérations usuelles aux aménagements hydroélectriques et celui avec les opérations préventives proposées. La comparaison des scénarios permet d'évaluer la réduction des dommages résultant des opérations préventives. De plus, l'interface de visualisation permet de rapidement repérer les points de contrôle qui présentent une situation dangereuse et les aménagements pouvant y remédier.

PERFORMANCES LORS DE LA GESTION DE CRUES

Resimulations d'événements extrêmes

Afin de pouvoir étudier la performance du système, des resimulations des prévisions COSMO-7 et COSMO-LEPS, pas disponibles à l'époque, ont été effectués pour la crue d'octobre 2000 et celle de septembre 1993.

Ces resimulations ont servi à plusieurs objectifs. Premièrement, elles ont été utilisées pour analyser les paramètres les plus sensibles de l'optimisation, définir ses valeurs de base et calculer la réduction potentielle des dommages selon les différentes fonctions objectives et algorithmes développés. Deuxièmement, elles ont servi de base à la réalisation de la simulation a posteriori d'une gestion de crue en «temps réel» et à l'évaluation de la performance du système avec des prévisions imparfaites.

Performance du système MINDS

Une analyse de performance des deux algorithmes utilisés lors de l'optimisation a permis de déterminer les points forts et faibles de chacun d'eux. Quand le nombre des groupes hydroélectriques est de 3 ou inférieur, l'algorithme SCE-UA offre de bonnes performances. Pour des nombres supérieurs de groupes, l'algorithme Greedy génère des solutions robustes dans un laps de temps relativement court, tandis que l'algorithme SCE-UA devient difficilement exploitable en temps réel et est moins performant à cause du grand nombre de paramètres du système (jusqu'à 64) et de sa non-linéarité.

En utilisant toutes les prévisions disponibles (des crues de 1993 et 2000), et en établissant une moyenne des résultats obtenus, des dommages supérieurs à 2 milliards de CHF sont obtenus pour le bassin théorique sans aménagements. Pour le bassin équipé et les opérations usuelles, les dommages descendent jusqu'à 1.3 milliards en moyenne. Finalement, une valeur inférieure à 0.9 milliards est obtenue grâce aux opérations préventives, et cela, avec un coût potentiel de pertes d'énergie situé seulement entre 1 et 2 millions de CHF.

Tous ces résultats sont évidemment liés aux prévisions disponibles. Ils ne donnent par conséquent pas une performance réelle, qui pourrait être réduite à cause d'une mauvaise

prévision hydro-météorologique. De même, les valeurs estimatives des dommages et des pertes d'énergie peuvent varier selon les événements et les conditions locales rencontrées.

La variation des paramètres secondaires, comme les horaires usuels de turbinage, le prix de l'énergie ou encore la classification des groupes hydroélectriques pour l'optimisation avec l'algorithme Greedy, n'affectent que peu les résultats de l'optimisation. Ceci confère une grande robustesse au système. Pour réduire ces incertitudes, les valeurs les plus probables de ces paramètres ont été sélectionnées comme paramètres de base du système pour la gestion de crues en temps réel.

Résultats de l'optimisation pour la crue d'octobre 2000

Une fois les valeurs des paramètres fixées, le système est prêt pour son utilisation. Lors d'une gestion en temps réel, les opérations préventives sont mises à jour continuellement au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles prévisions. Dès que les données d'une prévision sont connues, elles sont introduites dans MINDS et des nouvelles opérations préventives sont proposées si nécessaire.

Dans cet article, les résultats de l'optimisation faite a posteriori pour la crue d'octobre 2000, sont présentés (figure 7). Ils correspondent à une optimisation du bassin complet jusqu'à la Porte du Scex, avec tous les groupes hydroélectriques, et l'algorithme Greedy.

Deux simulations de base sont présentées:

- Simulation pour le bassin naturel (Q_{tot} Nat Bassin);
- Simulation pour le bassin équipé et les aménagements hydroélectriques en fonctionnement usuel (Q_{tot} BasU). Cette simulation se rapproche très correctement des débits observés.

Les résultats finaux provenant des optimisations successives effectuées pendant la crue sont aussi présentés à la figure 7. Trois types d'optimisations différentes sont réalisés sur le bassin équipé:

- Optimisation des opérations préventives sur la base des observations de l'événement de crue, faites a posteriori. Ce cas correspond à une prévision parfaite. (Q_{tot} PrevOp Obs);
- Optimisation des opérations préventives sur la base de prévisions déterministes COSMO-7 (Q_{tot} PrevOp Det);
- Optimisation des opérations préventives sur la base de prévisions probabilistes COSMO-LEPS (Q_{tot} PrevOp Prob).

La première constatation est que les trois types d'optimisation réduisent la pointe de la crue en comparaison du fonctionnement usuel. L'optimisation basée sur la prévision parfaite lamine davantage la pointe que les deux autres optimisations en raison des erreurs de prévision. Néanmoins, les optimisations qui s'appuient sur les prévisions hydrologiques provenant des prévisions COSMO-7 et COSMO-LEPS conduisent également à une réduction des dommages.

Le tableau 1 présente les résultats des dommages et des coûts potentiels de perte d'énergie sur le bassin complet pour la crue d'octobre 2000, ainsi que les débits de pointe à quatre points de contrôle. Une réduction des dommages grâce aux opérations préventives est observée dans tous les cas, avec des taux d'au moins 50%. La différence entre l'optimisation

basée sur la prévision parfaite et les autres et très importante. Elle s'explique par le fait qu'un seuil de débordement est dépassé dans les optimisations basées sur les prévisions, alors qu'il ne l'est pas dans l'optimisation de la prévision parfaite.

Il convient de remarquer que les montants de dommages sont des valeurs potentielles, qui pourraient arriver dans le pire des cas. Les coûts de perte d'exploitation ont également un caractère potentiel. En effet, si la pluie attendue se produit, les coûts potentiels de perte d'exploitation seront largement réduits, étant donné le remplissage du réservoir à la fin de l'évènement.

LE SYSTÈME OPÉRATIONNEL

Le système MINERVE, développé pour le bassin versant du Haut Rhône en amont du Léman, est opérationnel au Canton du Valais selon un fonctionnement manuel depuis 2006. Il s'appuie sur les prévisions météorologiques COSMO-7 (échéance à 3 jours) et permet de simuler les flux hydrauliques dans le réseau hydrographique. Le cas échéant, il permet par ailleurs de proposer des consignes d'exploitation préventives aux aménagements hydroélectriques destinées à renforcer la protection contre les crues.

Depuis 2008 les développements intègrent les prévisions COSMO-LEPS (échéance à 5 jours), qui contribuent à la prise de décisions prioritaires pour l'avertissement de crue ainsi que pour la gestion préventive des aménagements hydroélectriques dans un but sécuritaire, tenant compte des coûts et des risques potentiels d'inondation. De plus, la prévision météorologique COSMO-2, avec une échéance de 24 h, mais avec une maille beaucoup plus fine, a été aussi intégrée au système dans le but d'améliorer les prévisions déterministes à court terme.

La procédure cantonale de gestion des crues du Rhône a été officiellement approuvée en 2009 et est actuellement appliquée, avec le système MINERVE comme élément important de la procédure de décision (GARCIA HERNANDEZ *et al.* 2011b).

En 2011, plusieurs nouveaux outils ont été implémentés au Canton du Valais. Le système d'aide à la décision MINDS a été transféré et est opérationnel. Il permet d'évaluer les stratégies optimales de gestion des aménagements hydroélectriques en tenant compte de scénarios hydro-météorologiques déterministes et/ou probabilistes, lors des éventuelles crues du Rhône. La prévision météorologique par adaptation statistique (méthode des analogues) a aussi été implémentée et fonctionne de façon automatique quotidiennement.

Dès 2012, de nouvelles améliorations du système suivront. D'une part, l'outil de simulation hydrologique Routing System MINERVE fonctionnera en mode automatique. D'autre part, un nouveau tableau de bord sera développé pour synthétiser l'information sur la situation présente du bassin du Rhône (débits du Rhône et des principaux affluents, situation et prévisions météorologiques, niveaux des réservoirs d'accumulation, état de fonctionnement des aménagements hydroélectriques,...) et toute autre information issue du système MINERVE (prévisions hydro-météorologiques, avertissements, gestion des barrages,...). Cet outil fournira une vue synoptique de la situation hydro-météorologique sur l'ensemble du bassin.

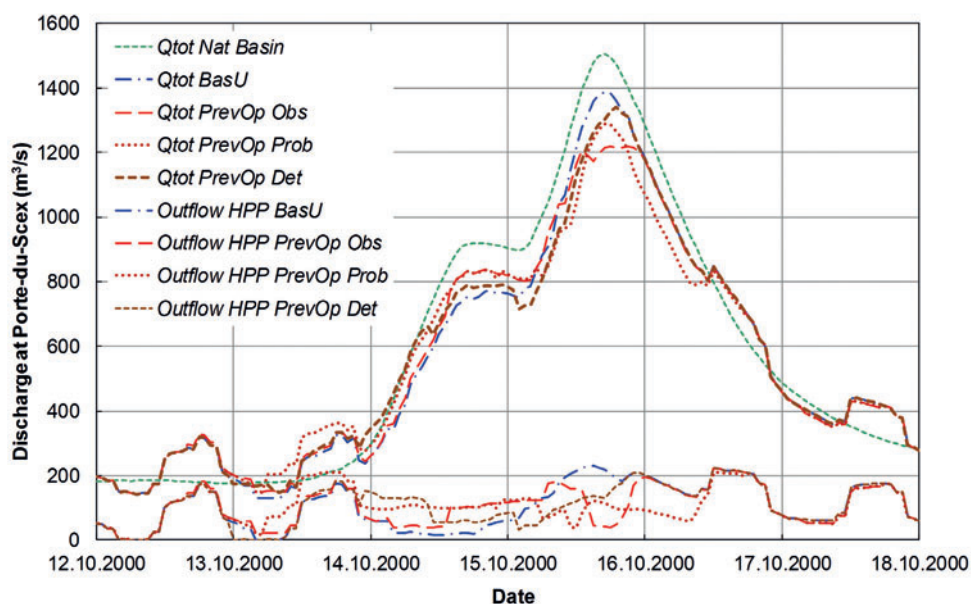


Figure 7.—Hydrogrammes pour la crue d’octobre 2000 à l’exutoire du bassin, Porte du Scex. “Qtot Nat Basin” correspond à l’hydrogramme résultant de la simulation avec le bassin naturel, “Qtot BasU” à l’hydrogramme simulé avec le bassin équipé et les opérations usuelles, “Qtot PrevOp Obs” à l’hydrogramme final résultant des opérations préventives faites avec une prévision parfaite, “Qtot PrevOp Prob” à l’hydrogramme final résultant des opérations préventives avec COSMO-LEPS et “Qtot PrevOp Det” à l’hydrogramme final résultant des opérations préventives avec COSMO-7. “Outflow HPP BasU” représente l’addition de tous les débits sortants de tous les aménagements hydroélectriques calculés pour les opérations usuelles, “Outflow HPP PrevOp Obs” les débits résultant de l’optimisation avec une prévision parfaite, “Outflow HPP PrevOp Prob” les débits après optimisation avec COSMO-LEPS et “Outflow HPP PrevOp Det” les débits sortants après optimisation avec COSMO-7.

Tableau 1.—Coût des dommages, coût potentiel des opérations préventives et débit de pointe, calculés sur la base des simulations du bassin naturel et équipé avec opérations usuelles (Business as Usual, BasU), ainsi qu’après optimisation pour la prévision parfaite (Opt OBS), les prévisions COSMO-LEPS (Opt C-L) et COSMO-7 (Opt C-7).

	Bassin Naturel	BasU	Opt OBS	Opt C-L	Opt C-7
Dommages estimés (10 ⁶ CHF)	3’071	2’551	111	1’045	1’269
Coût opérations préventives (10 ⁶ CHF)	0.00	0.00	1.71	1.87	1.13
Pointe - Porte du Scex (m ³ /s)	1’505	1’389	1’220	1’287	1’339
Pointe - Branson Aval (m ³ /s)	1’376	1’314	1’153	1’207	1’248
Pointe - Sion OFEV (m ³ /s)	1’135	1’071	908	972	1’030
Pointe - Steg (m ³ /s)	866	859	709	764	827

CONCLUSIONS

Le système MINERVE est intégré à la procédure cantonale de gestion des crues du Rhône alpin. L'objectif est d'établir une gestion et une coordination optimale des actions permettant de réduire le risque d'inondation en tenant compte de la situation hydro-météorologique présente et future à l'échelle du bassin versant (Rhône et affluents, aménagements hydroélectriques). La démarche s'appuie sur le suivi et l'exploitation des données d'observation ainsi que sur les prévisions hydro-météorologiques. Le système doit fournir le niveau d'information nécessaire afin que l'organe décisionnel cantonal détermine le niveau d'intervention et déclenche les mesures de protection adéquates.

Avec un souci permanent de perfectionnement et de consolidation, le projet MINERVE modernise son environnement opérationnel en même temps que se poursuivent les activités de recherche appliquée et de développement. Il bénéficie de l'amélioration constante des prévisions hydrométéorologiques pour une gestion optimale des aménagements hydroélectriques.

Le programme MINDS (MINERVE Interactive Decision Support System) a été développé dans le cadre de ce projet pour l'optimisation des mesures préventives au niveau des aménagements hydroélectriques lors de crues majeures. Les scénarios de gestion proposés peuvent être utilisés par l'organe décisionnel cantonal pour limiter les dommages liés aux crues grâce à des opérations de turbinage / vidange préventives totalement ciblées (aménagements sollicités, type et durée des actions).

L'application rétroactive de MINDS à des situations historiques a permis de démontrer sa performance. La diminution de la pointe de crue, pour les évènements de 1993 et de 2000, est dans tous les cas supérieure à 10% grâce aux opérations préventives proposées. Même avec des prévisions imparfaites, le système est capable de fournir de bons résultats, en profitant aussi de l'inertie comportementale du bassin versant.

Il ne faut pas oublier cependant que les opérations préventives comportent toujours un certain risque économique et/ou environnemental. La vue d'ensemble de l'évènement, avec les possibles dommages et pertes d'exploitation, doit être considérée pour définir la bonne stratégie. A cet égard, MINDS constitue un outil d'aide à la décision répondant parfaitement à cet objectif et adapté à une gestion intégrée du risque.

REMERCIEMENTS

Le projet MINERVE est développé en partenariat avec l'Office Fédéral de l'Environnement, les Services des Routes et Cours d'Eau, de l'Energie et des Forces Hydrauliques du Canton du Valais et le Service des Eaux, Sols et Assainissement du Canton de Vaud. L'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) fournit les prévisions météorologiques et les sociétés hydroélectriques communiquent les informations relatives à leurs aménagements. Les développements scientifiques sont confiés à deux entités de l'EPFL, le Laboratoire d'Ecophysique et le Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ainsi qu'à l'Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque de l'UNIL.

En Valais, la mise en œuvre opérationnelle du projet MINERVE est actuellement assurée par le Pôle GestCrues du CREALP. Cette nouvelle entité a pour mission d'établir un centre de compétences cantonal pour la prévision hydrométéorologique et la gestion de crues. Son objectif principal est la coordination des activités scientifiques et techniques liées à la mise en place et à la maintenance, au Canton du Valais, d'un dispositif efficace de sécurité contre les crues majeures.

RÉFÉRENCES

- BÉROD D., 1994. Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement. *PhD Thesis N° 1319, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- BOILLAT J.-L., 2005. L'influence des retenues valaisannes sur les crues. Le projet MINERVE. *Communication 21 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3^e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, Martigny, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne, 87-101*.
- BOILLAT J.-L., 2009. Prévision hydrologique et aide à la décision. *Swiss Engineering* 7/8: 10.
- CHEN S.-T. & YU P.-S., 2007. Real-time probabilistic forecasting of flood stages. *Journal of Hydrology* 340: 63-77.
- DECHTER & DECHTER 1989. On the Greedy Solution of Ordering Problems. *ORSA Journal on Computing, Vol. 1, No. 3, 181-189*.
- DUAN Q., SOROOSHIAN S. & GUPTA V. 1992. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Management, Vol. 28, No. 4, 1015-1031*.
- DUAN Q., GUPTA V. & SOROOSHIAN S., 1993. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 76, No. 3, 501-521*.
- DUBOIS J. & BOILLAT J.-L., 2000. Routing System – Modélisation du routage des crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre. *Communication 9 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne*.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., JORDAN F., DUBOIS J. & BOILLAT J.-L., 2007. Routing System II: Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques. *Communication 32 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne*.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., BOILLAT J.-L., JORDAN F. & HINGRAY B., 2009a. La prévision hydrométéorologique sur le bassin versant du Rhône en amont du Léman. *La Houille Blanche* 5: 61-70.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., HORTON P., TOBIN C. & BOILLAT J.-L., 2009b. MINERVE 2010: Prévision hydrométéorologique et gestion des crues sur le Rhône alpin. *Wasser Energie Luft* 4: 297-302.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., 2011a. Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts. *PhD Thesis N°5093, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., BRAUCHLI T., BOILLAT J.-L. & SCHLEISS A. J., 2011b. La gestion des crues du Rhône en amont du Léman: de la prévision à la décision. *La Houille Blanche* 2: 69-75.
- HAMDI Y., HINGRAY B. & MUSY A., 2005. Un modèle de prévision hydro-météorologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse. *Wasser Energie Luft* 11-12: 325-332.
- HINGRAY B., MEZGHANI A., SCHAEFLI B., NIGGLI M., FAIVRE G., GUÉX F., HAMDI Y. & MUSY A., 2006. Estimation des débits de crue du Rhône à Porte du Scex et autres points amont caractéristiques. *Rapport final du projet CONSECRU 2. Laboratoire Hydrologie et Aménagements*. EPFL, Lausanne, 83p. + 86p. Annexes.
- HORTON P., JABOYEDOFF M., METZGER R., OBLED C. & MARTY R., 2011. Prévision des précipitations par adaptation statistique sur le bassin alpin du Rhône. *Proceedings of the 2ème Rencontre sur les Dangers Naturels, UNIL, Lausanne, 187-191*.
- JORDAN F., 2007. Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. *PhD Thesis N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- JORDAN F., GARCÍA HERNÁNDEZ J., DUBOIS J. & BOILLAT J.-L., 2008. MINERVE: Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets. *Communication 38 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne, ISSN 1661-1179*.
- JORDAN F., BOILLAT J.-L. & SCHLEISS A., 2010. Prévision et gestion des crues du Rhône supérieur par l'exploitation optimale des retenues alpines. *La Houille Blanche* 5: 91-102.
- MARSIGLI C., BOCCANERA F., MONTANI A. & PACCANGNELLA T. 2005. The COSMO-LEPS ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlinear Processes in Geophysics* 12: 527-536.

- MARSIGLI C., MONTANI A. & PACCANGNELLA T., 2008. A spatial verification method applied to the evaluation of high-resolution ensemble forecasts. *Meteorological Applications* 15 (1): 125-143.
- SCHAEFLI, B., HINGRAY, B., NIGGLI, M. & MUSY, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2: 73-117.
- SERVICE DE LA SÉCURITÉ CIVILE ET MILITAIRE (2009). Procédure lors de crues du Rhône pour les cantons du Valais et de Vaud. *Rapport final accepté, Section organisation, planification et prévention en cas de catastrophes, Département des finances, des institutions et de la sécurité, Grône, Canton du Valais*.
- TOBIN C., NICOTINA L., PARLANGE M. B., BERNE A. & RINALDO A., 2011. Improved Interpolation of Meteorological Forcings for Hydrologic Applications in a Swiss Alpine Region. *Journal of Hydrology*, 401(1-2): 77-89.