Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 97 (2005)

Heft: 11-12

Artikel: Un modèle de prévision hydrométérologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse

Autor: Hamdi, Yasser / Hingray, Benoît / Musy, André

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941778

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 11.01.2026

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

Un modèle de prévision hydrométéorologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse

Yasser Hamdi, Benoît Hingray, André Musy

Résumé

Cet article présente les principaux résultats des activités menées dans le cadre du projet Minerve par le laboratoire Hydrologie et Aménagements (Hydram) de l'Institut des Sciences et Technologie de l'Environnement de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ce projet a été initié par le Canton du Valais dans le but de prévoir les crues importantes du Rhône à l'amont du lac Léman ainsi que de ses principaux affluents et d'en réduire si possible les impacts par diverses actions préventives. Le projet fait suite aux inondations catastrophiques de Septembre 1993. La contribution de l'Hydram à ce projet a consisté à développer une méthodologie capable de produire l'évolution temporelle des débits pour les 72 heures à venir en différents points du réseau hydrographique du bassin considéré. Ces prévisions hydrologiques sont réalisées sur la base de la météorologie observée en temps réel aux différentes stations de mesure du réseau d'observation au sol et sur la base de la météorologie prévue par le modèle de prévision météorologique aLMo de MétéoSuisse. L'approche utilisée pour prévoir les débits résultant de ces situations météorologiques combine différents modèles dont en particulier un modèle hydrologique conceptuel déterministe adapté au milieu alpin considéré. La modélisation permet en particulier de simuler les débits provenant des précipitations liquides, de la fonte de neige et de la fonte glaciaire. Un modèle de mise à jour des variables d'état du modèle hydrologique permet de plus de gérer en temps réel les erreurs constatées a posteriori entre les débits prévus et les débits observés en différents stations de contrôle. Cette communication présente succinctement les concepts principaux de ce modèle de prévision ainsi que quelques résultats obtenus pour l'application de la méthode sur le Rhône à Brigue.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojekts Minerve vor, das am Labor für Hydrologie und Raumplanung (Hydram) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne durchgeführt wurde. Dieses Projekt wurde infolge der katastrophalen Überschwemmungen im Jahr 1993 durch den Kanton Wallis initiiert, um gefährliche Hochwasser der Rhone oberhalb der Genferseemündung vorherzusagen. Das Vorhersagemodell bezieht auch die wichtigsten Rhone-Zuflüsse mit ein und soll gleichzeitig ermöglichen, die Auswirkungen verschiedener präventiver Massnahmen abzuschätzen. Der Beitrag des Hydram zu diesem Projekt war die Entwicklung einer Simulationsmethode zur Vorhersage der Abflüsse an verschiedenen Orten des analysierten Gewässernetzes über einen Zeitraum von 72 Stunden. Diese hydrologischen Vorhersagen beruhen auf meteorologischen Beobachtungen an verschiedenen Messstationen und den Wettervorhersagen des Vorhersagemodells aLMo von MeteoSchweiz. Die entwickelte Methode zur Vorhersage der Abflüsse besteht aus einer Modellkombination, deren Kernbestandteil ein konzeptuelles hydrologisches Modell für hochalpine Einzugsgebiete ist. Dieses Modell erlaubt die Simulation von Abflüssen, die aus Regen, Schnee- und Gletscherschmelze entstehen. Ein Modell zur Korrektur der Zustandsvariablen erlaubt es gleichzeitig, die Modellfehler in Echtzeit auszugleichen. Diese Modellfehler werden durch Vergleichen der Simulationen und der Messungen an mehreren Kontrollpunkten ermittelt. Dieser Beitrag stellt die grundlegenden Konzepte dieses Vorhersagemodells und die wichtigsten Resultate anhand einer Anwendung für die Rhone bei Brig vor.

1. Introduction

Le concept de prévision hydrologique présenté dans cet article ainsi que les modèles associés ont été développés au sein du laboratoire Hydrologie et Aménagements (Hydram) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) dans le cadre du projet Minerve (Boillat et al., 2002). Ils ont été élaborés pour la prévision des débits horaires en différents points du réseau hydrographique du Rhône à l'amont du Léman (Hamdi et al., 2005). Un outil opérationel de prévision hydro-météorologique des crues pour le Rhône est en cours de développement sur la base de ce concept. Il est réalisé par le bureau d'étude Hydrocosmos (Dubois, 2005). Il intègre par ailleurs les aspects de modélisation liés d'une part au fonctionnement des aménagements hydrauliques présents dans le système (prises d'eau, barrages,...) et d'autre part à la propagation de l'onde de crue dans le réseau hydrographique principal. Ces autres aspects, non présentés dans cet article sont développés par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL (Jordan et al., 2005).

En mode opérationnel, le système de prévision hydro-météorologique sera alimenté en continu par les données hydrométriques et météorologiques observées aux différentes stations de mesures (publiques et privées) situées dans ou à proximité du bassin. Le système permet ainsi d'avoir une estimation à tout moment de l'état des bassins versants (stocks de neiges, état de saturation des bassins versant, état de remplissage des réservoirs artificiels...) et en particulier avant un événement météorologique pouvant devenir critique. Dès qu'une alarme hydro-météorologique est émise (émission sur la base des mesures au sol, des hauteurs de précipitations prévues ou des bulletins d'alarme MétéoSuisse), c'est à dire dès lors qu'une situation potentiellement critique est identifiée, le système réalise une

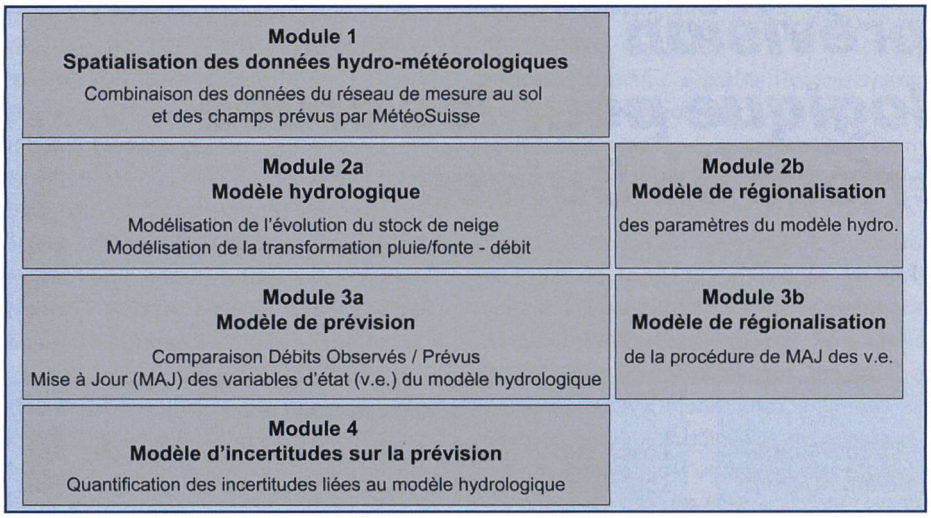

Figure 1. Concept du modèle de prévision hydrologique.

prévision des débits horaires sur les 72 h à venir. Il utilisera pour ce faire les prévisions à 72 h des champs horaires de différentes variables météorologiques (précipitations, températures) produites par le modèle aLMo, le modèle de prévisions météorologiques développé et exploité en temps réel par Météosuisse. Les prévisions hydrologiques seront de plus renouvellées avec une fréquence supérieure ou égale à la fréquence de renouvellement des prévisions Météosuisse qui est actuellement de 12 h.

La présente communication décrit dans une première partie le bassin versant modèlisé puis les différents modèles constituant le système de prévision hydrologique développé (figure 1).

2. Le système étudié

Le bassin versant du Rhône a une superficie de plus de 5000 km^2 à son embouchure dans le Léman. Il couvre une gamme d'altitudes importante et certains massifs y atteignent des sommets à plus de 4000 m. Il contient par ailleurs de nombreuses régions couvertes de glaciers. Ceci induit en particulier des comportements hydrologiques très différents suivants les sous-bassins versants. Les crues qui s'y produisent proviennent de situations météorologiques conduisant soit à des précipitations régionales importantes, soit à une fonte de quantités considérables de neige accumulée sur les versants, soit à une combinaison de ces deux phénomènes. La modélisation hydrologique doit donc tenir compte non seulement des débits dus aux précipitations, mais également de ceux liés à la fonte de la neige et de la glace. Elle doit par suite aussi permettre d'estimer la quantité de neige accumulée sur les versants à un moment donné de l'année.

Le bassin versant du Rhône comporte un nombre important d'aménagements hydrauliques dont le fonctionnement en modifient profondément le comportement hydrologique (Spreafico, 1992). Il a de ce fait été discrétisé en 239 bassins versants dont la taille varie entre 10 km^2 et 100 km^2. Cette discrétisation a été réalisée conjointement avec le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL sur la base de la discrétisation fournie par le Service valaisan des Forces Hydrauliques. Elle réalise un compromis entre la nécessité de prendre en compte toutes les prises d'eau et la nécessité de réduire le nombre et la diversité des entités hydrologiques à modéliser.

3. Traitement des données météorologiques

Les données météorologiques retenues comme entrées du modèle hydrologique sont les précipitations et les températures horaires. La détermination de ces variables pour chaque unité hydrologique du modèle nécessite un prétraitement des données disponibles.

Pour la simulation des débits du passé proche, les données utilisées sont celles provenant du réseau de mesure au sol (stations climatologiques, stations pluviométriques) éventuellement complétées par les champs des variables météorologiques prévus par MétéoSuisse. La spatialisation de ces données stations est délicate du fait du contexte montagneux considéré. Plusieurs méthodes de spatialisation des précipitations ont été comparées dans le cadre de ce projet par Faivre (2004). A défaut de méthode éprouvée pour ce contexte difficile, la spatialisation des précipitations est effectuée par une moyenne pondérée des précipitations observées aux stations situées dans ou à proximité de l'unité hydrologique considérée. La méthode permet une mise à jour rapide des pondérations en cas de panne ou de réactivation de l'une ou l'autre des stations du réseau de mesure. Les températures sont spatialisées sur le même principe à la différence que l'on tient compte en plus de la dépendance observée à chaque pas de temps entre la température et l'altitude. Il est important de noter que la spatialisation des températures, essentielle pour l'estimation de l'altitude de la limite des chutes de neige ainsi que pour l'estimation de l'altitude de l'isotherme 0 °C, est aussi délicate que la spatialisation des précipitations.

Pour la prévision des débits futurs, seuls sont utilisés les champs météorologiques prévus par le modèle aLMo de MétéoSuisse. Les précipitations au sol et les températures pour différents niveaux géopotentiels sont disponibles en chaque point d'une grille régulière (résolution d'environ 7×7 km^2 sur la zone étudiée) couvrant la totalité du bassin du Rhône. Un prétraitement de ces données est aussi nécessaire pour produire les variables météorologiques nécessaires à chaque unité hydrologique. La méthodologie utilisée pour ces prétraitements est détaillée dans Hamdi et al. (2005).

4. Modélisation hydrologique

Différentes approches ont été développées et appliquées avec succès pour la prévision des crues sur des systèmes hydrologiques variés (tant pour les conditions hydro-climatiques des bassins étudiés que pour les processus principaux en jeu dans la formation des crues analysées). Une revue des approches possibles est donnée par Fortin et al. (1997. Certaines approches empiriques telles que celles basées sur les modèles autorégressifs ou les réseaux de neurones démontrent souvent des performances très intéressantes. Une application de quelques uns de ces modèles a été réalisée, sous la direction conjointe de l'Hydram et du Laboratoire d'Automatisme de l'EPFL, pour plusieurs bassins du Rhône par Mtir (2004). Ces modèles présentent cependant certaines limites qui les rendent inexploitables pour une application sur un système complexe tel que celui étudié ici. Ces modèles ne sont véritablement appropriés que pour la représentation de comportements linéaires ou pseudo linéaires entre variables explicatives et variable expliquée. Les seules variables explicatives actuellement utilisables dans

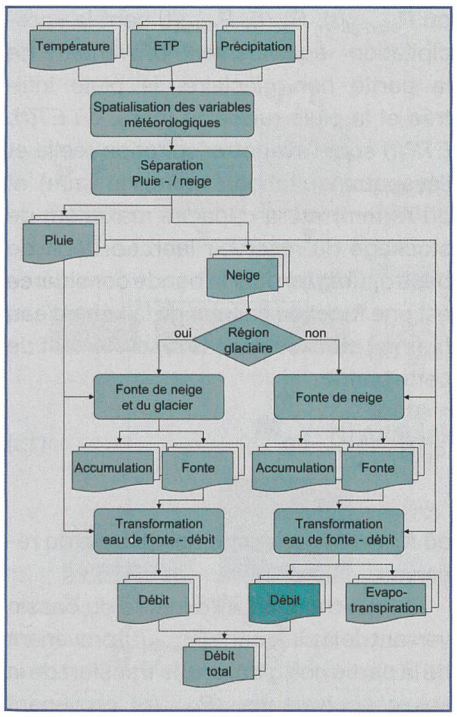

Figure 2. Schéma de principe du modèle hydrologique.

notre contexte sont les précipitations et les températures au sol. Le stockage puis destockage différé d'une partie des précipitations par le biais du manteau neigeux rend cependant la relation précipitations-débit fortement non-linéaire et donc difficile à représenter. Cette limitation pourrait être partiellement levée par un prétraitement approprié des données météorologiques (Mtir, 2004). Une limitation plus sérieuse de ces approches empiriques provient du fait qu'elles sont très mal adaptées pour une application à des bassins non-jaugés. Leurs paramètres, obtenus par calage sur les bassins jaugés, n'ont aucun sens physique, ni conceptuel. Une extrapolation de ces paramètres pour les bassins non jaugés est donc hasardeuse. La structure de ces modèles doit aussi souvent être optimisée pour s'accorder au mieux au jeu de données observées. Elle peut par suite différer d'un bassin à un autre ce qui interdit la transposabilité spatiale du modèle.

Le modèle hydrologique retenu pour le projet Minerve permet de s'affranchir des limitations relevées pour les approches mentionnées ci dessus. C'est un modèle conceptuel semi-distribué dit à réservoirs. Il permet de réaliser une simulation dite continue, nécessaire pour permettre de suivre l'évolution temporelle et spatiale de l'état des différents compartiments de stockage de l'eau dans le système (sous forme liquide ou solide). Il se base sur le modèle GSM-SOCONT développé à l'Hydram dans le cadre du projet de recherche européen Swurve (Schaefli, 2005; Schaefli et al., 2005). Le modèle GSM-SOCONT a été adapté pour les contraintes spécifiques du projet Minerve (Peissard, 2003; Hamdi et al., 2005). Les éléments principaux de ce modèle modifié sont synthétisés dans les paragraphes suivants (v. aussi Figure 2).

4.1 Discrétisation spatiale

Chacun des 239 sous-bassins versants du sys-tème complet est représenté par un ensemble d'unités hydrologiques spatiales dont chacune est supposée avoir un comportement hydrologique homogène. La partie glaciaire d'un bassin versant (partie recouverte de glacier) et la partie non glaciaire sont de fait modélisées séparément. La distinction est faite sur la base de la digitalisation des glaciers réalisée à l'aide des cartes nationales de l'Office Fédéral de la Topographie et du contour du bassin versant. Par ailleurs une discrétisation en bandes d'altitudes est opérée de façon à reproduire au mieux la variabilité altitudinale de la dynamique du stock de neige. Une analyse de sensibilité a en effet clairement montré le gain en performance du modèle lorsque l'on augmente le nombre de bandes d'altitude pour simuler l'évolution du stock de neige (Schaefli et al., 2005; Hamdi et al., 2005). La discrétisation en bandes d'altitudes est réalisée sur la base de la courbe hypsométrique du bassin considéré. Le débit produit par chaque bassin versant est finalement estimé par la somme des débits de ruissellement produits par les différentes bandes d'altitude du bassin.

4.2 Evolution temporelle du manteau neigeux et fonte de neige

Pour chaque bande d'altitude de chaque bassin versant, une série de température et de précipitation est estimée sur la base des températures et des précipitations observées et prévues (cf. paragraphe ci dessus). La température horaire conditionne d'abord la nature des précipitations (pluie, neige, mélange). La séparation pluie/neige se fait suivant la fonction de répartition suivante:

Si $T(t)<Tc_1$ alors $N(t)=P(t)$; $Pluie(t)=0$ (1)

Si $Tc_1<T(t)<Tc_2$ alors $N(t)=P(t)*(T(t)-Tc_2)/(Tc_1-Tc_2)$; $Pluie(t)=P(t)-N(t)$ (2)

Si $Tc_2<T(t)$ alors $N(t)=0$; $Pluie(t)=P(t)$ (3)

où $P(t)$, $N(t)$ et $Pluie(t)$ sont respectivement la hauteur précipitée totale, précipitée sous forme solide ou sous forme liquide, où $T(t)$ est la température au pas de temps t et où Tc_1 et Tc_2 sont deux température critiques à estimer. Pour chaque bande, l'évolution temporelle du stock de neige est estimée par le biais d'un modèle conceptuel d'accumulation et de fonte. Le manteau neigeux est supposé avoir une certaine capacité de rétention qui lui permet de stocker l'eau liquide provenant soit de la fonte de neige soit des précipitations lorsqu'elles sont liquides. L'approche retenue est similaire à celle présentée par Kuchment et Gelfan (1996) et à celle utilisée en Suède dans une version récente du modèle HBV (Grabs, 2005) ou au Canada dans le modèle HSAMI (V. Fortin, communication personnelle).

Les précipitations solides et les précipitations liquides estimées par le modèle de répartition pluie/neige sont respectivement ajoutées au réservoir de neige et au réservoir d'eau liquide contenu dans le stock de neige. De même que le second réservoir peut être alimenté par la fonte de neige provenant du réservoir de neige, le réservoir de neige peut être aussi alimenté par la quantité d'eau liquide (re)mobilisée sous forme solide lors de températures négatives. Un débit de ruissellement est produit par le manteau neigeux lorsque la quantité d'eau liquide présente dans le manteau neigeux dépasse sa capacité de rétention. La vidange éventuelle d'une partie de l'eau liquide contenue dans le manteau neigeux produit une «pluie-équivalente» $P_{eq}(t)$ issue de la bande d'altitude considérée. Les équations qui régissent le comportement de ces deux réservoirs sont détaillées ci dessous.

$$\frac{dH_n(t)}{dt} = N(t) - M(t) \quad (4)$$

$$\frac{dH_n(t)}{dt} = N(t) - M(t) \quad (5)$$

où $H_n(t)$ et $W_n(t)$ sont respectivement le stock de neige et le stock d'eau liquide au sein du manteau neigeux (Figure 3) et où $M(t)$ est le flux d'eau échangé entre les deux réservoirs. $M(t)$ est le flux $M_n(t)$ de neige fondue en cas de température positive ou le flux $M_r(t)$ de regel en cas de température

négative (les quantités de neige fondue ou de regel sur un pas de temps donné sont limitées respectivement par le stock de neige disponible et le stock d'eau liquide disponible au sein du manteau neigeux au début de ce pas de temps). Ce flux est estimé à l'aide d'un modèle s'apparentant à la méthode du degré jour.

Fonte: Si $Tc_3<T(t)$ alors
$M(t)=M_n(t)=a_n.(1+b_{pluie}.Pluie(t)).(T(t)-Tc_3)$ (6)

Regel: Si $T(t)<Tc_3$ alors
$M(t)=M_r(t)=a_r.(T(t)-Tc_3)$ (7)

où a_n et a_r sont respectivement les coefficients de fonte ou de regel apparentés au degré jour (en mm/°C/heure), où b_{pluie} est un paramètre (heure/mm) permettant de prendre en compte une fonte plus importante en cas de précipitations liquides sur le stock neigeux et où Tc_3 est la température critique de fonte ou de regel ($Tc_3 = 0$ °C). La pluie équivalente a finalement l'expression suivante:

si $W_n(t)< \theta_r.H_n(t)$: $P_{eq}(t)= 0$ (8)

si $W_n(t)>\theta_r.H_n(t)$:
$P_{eq}(t)= (W_n(t)-\theta_r.H_n(t)) / K_f$ (9)

où θ_r est la capacité maximum de stockage du réservoir neige et où K_f (en heures) est une constante de vidange du réservoir eau liquide lorsque cette capacité de rétention est dépassée.»

4.3 Fonte glaciaire

Pour chaque bande glaciaire découverte (stock de neige vide pour la bande d'altitude considérée), la lame d'eau $M_g(t)$ provenant de la fonte glaciaire est aussi calculée sur la base d'une expression de type degré-jour:

$M_g(t)=a_g.(T(t)-Tc_3)$ (9)

où a_g est le coefficient de fonte du glacier apparenté au degré jour (en mm/°C/heure). Le stock de glace disponible pour le calcul de la fonte glaciaire est supposé infini.

4.4 Fonctions de transfert

Le transfert à l'exutoire du bassin versant de la «pluie équivalente» provenant de chacune des bandes de la partie non-glaciaire est opéré par deux réservoirs linéaires sensés représenter respectivement les écoulements lents et les écoulements rapides (Consuegra et al., 1998) et similaires aux réservoirs de type GR (Edijatno et Michel, 1989). Une partie de la «pluie équivalente» s'infiltre, l'autre ruisselle, ces deux fractions alimentant respectivement les réservoirs lents et rapides (Figure 4). Le réservoir lent se vidange par le biais de l'évapotranspiration $ET(t)$ et d'un débit de base $q_L(t)$. La fraction de la pluie équivalente qui s'infiltre ainsi que l'évapotranspiration réelle sont fonction du taux de remplissage du réservoir lent:

$$P_{inf}(t) = P_{eq,n-gl}(t)\left(1-\left(\frac{h_L(t)}{A}\right)^2\right) \quad (10)$$

$$P_{nette}(t) = P_{eq,n-gl}(t) - P_{inf}(t) \quad (11)$$

$$ET(t) = PET(t)\cdot\left(\frac{h_L(t)}{A}\right)^{0.5} \quad (12)$$

où $P_{eq,n-gl}(t)$, $P_{inf}(t)$, $P_{nette}(t)$ sont la «précipitation équivalente» provenant de la partie non glaciaire, la pluie infiltrée et la pluie ruisselée (mm), où $ET(t)$, $ETP(t)$ sont l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle (mm) et où A (mm) est la capacité maximum de stockage du réservoir lent. Le débit de base q_L (mm/h) pour la bande considérée est une fonction linéaire de la lame d'eau h_L (mm) stockée dans le réservoir lent de cette bande.

$$q_L(t) = \frac{h_L(t)}{K_L} \quad (13)$$

où K_L est la constante de vidange du réservoir.

Le transfert à l'exutoire du bassin versant de la pluie nette ($P_{nette}(t)$) provenant de la partie non glaciaire, le transfert de la «pluie équivalente» ($P_{eq-gl}(t)$) provenant de la partie glaciaire ainsi que le transfert de la lame d'eau ($M_g(t)$) provenant de la fonte glaciaire est opéré par le biais de réservoirs linéaires spécifiques. Le fonctionnement de chacun de ces réservoirs est régi par une équation de continuité et une équation de débit faisant intervenir un paramètre de vidange à caler:

$$\frac{dh_k}{dt} = qe_k(t) - qs_k(t) \quad (14)$$

$$qs_k(t) = \frac{h_k(t)}{K_k} \quad (15)$$

où $h_k(t)$: lame d'eau stockée dans le réservoir linéaire k (en mm);
$qe_k(t)$: débit entrant (en mm/h) (pluie nette, «pluie équivalente» ou fonte de glace);
$qs_k(t)$: débit sortant (en mm/h);
K_k: constante de vidange du réservoir (en h);
$k=r$: réservoir «rapide» pour le transfert de la pluie nette dans la partie non-glaciaire,
$k=n$: réservoir de transfert pour la neige fondue ou pour la pluie (en l'absence de couvert neigeux) provenant de la partie glaciaire,
$k=g$: réservoir de transfert pour la fonte de glacier provenant de la partie glaciaire.

4.5 Débit total à l'exutoire du bassin versante

Le débit total à l'exutoire du bassin versant est finalement obtenu par la somme, pondérée par les surfaces res-pectives

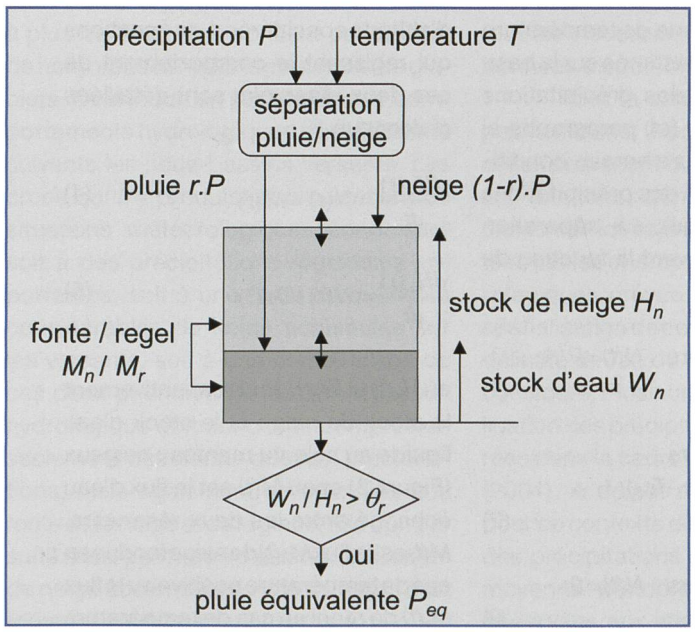

Figure 3. Modèle de fonte et de suivi du stock de neige pour une bande d'altitudes donnée.

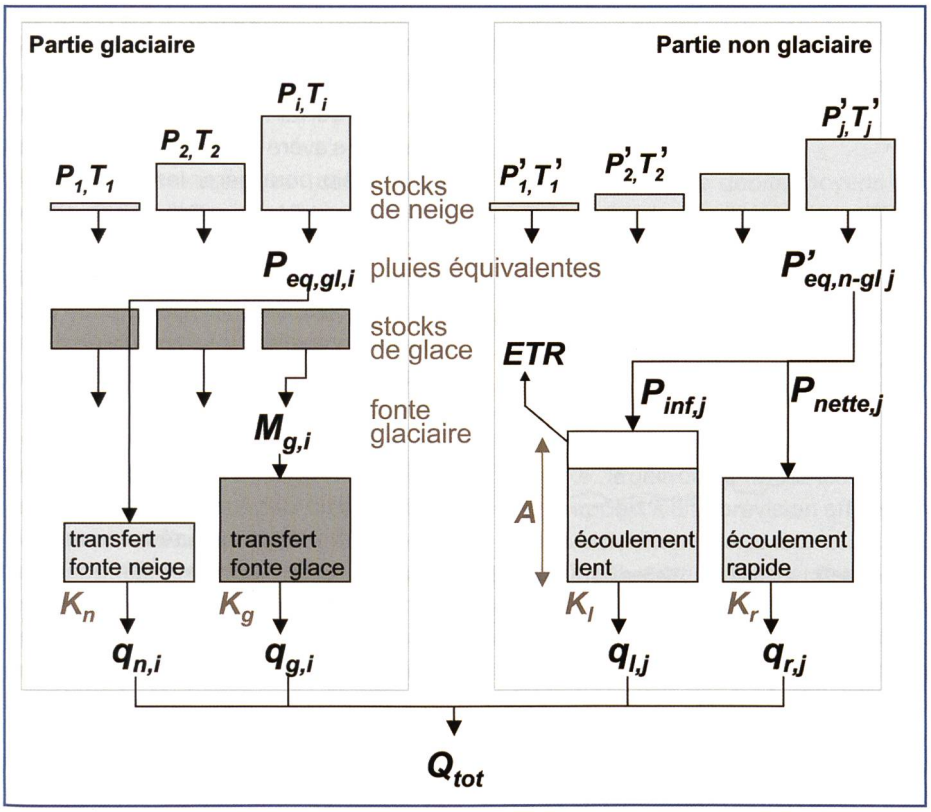

Figure 4. Stocks de neige, pluies équivalentes, fonte glaciaire et fonctions de transfert utilisées dans le modèle hydrologique.

des bandes des parties glaciaires et non-glaciaires, des lames d'eau provenant des différents réservoirs précédents (2**i* réservoirs pour la partie gla-ciaire, 2**j* réservoirs pour la partie non- glaciaire correspondant respectivement aux *i* et *j* bandes de ces deux parties).

4.6 Estimation des paramètres du modèlee

Le modèle hydrologique comportent 8 à 11 paramètres à estimer (suivant que le bassin comporte ou non une partie glaciaire). Pour les bassins versants jaugés, les paramètres peuvent être en principe calibrés. La calibration est cependant loin d'être facile dans le contexte étudié. Les données météorologiques ne sont disponibles au pas de temps horaire qu'à partir des années 80 et les bassins jaugés de la zone d'étude ont, pour une grande majorité, un comportement hydrologique fortement perturbé depuis les années 1950-60 (période de construction des barrages en Valais). L'échantillon des bassins disposant de données concomitantes de précipitations, températures et débits naturels se réduit de ce fait à moins d'une dizaine. La procédure de calibration a été élaborée pour assurer une certaine cohérence régionale des paramètres et ainsi permettre une estimation raisonnable de ces derniers pour les bassins non jaugés ou pour les bassins jaugés fortement perturbés. La procédure tente d'utiliser le maximum d'information disponible. Les principales étapes sont résumées ci-dessous.

Les températures critiques de séparation pluie/neige ont été déterminées sur la base des observations effectuées en différentes stations climatologiques de MétéoSuisse (précipitations, nature des précipitations, températures). La faible variabilité spatiale et temporelle de ces températures a conduit à l'utilisation de valeurs régionales constantes: Tc_1=0 °C; Tc_2=2 °C. Les valeurs des paramètres du modèle de fonte (b_{pluie} et θ_r) sont celles utilisées dans le modèle canadien HSAMI (Fortin, 1999). Une relation de dépendance entre le degré jour de fonte de neige a_n et l'altitude a été établie sur la base des séries de précipitation, températures et hauteurs de neige mesurées aux stations climatiques mentionnées ci-dessus. Les paramètres de cette relation ont été ensuite ajustés pour chaque bassin de sorte que combinés au degré jour pour la fonte du glacier (a_g) le cycle inter-annuel moyen observé sur la période naturelle disponible soit reproduit. La capacité maximum de stockage *A* et la constante de vidange K_L du réservoir lent ont été estimés pour les quelques bassins non-glaciers disponibles dans la région. Des valeurs régionales constantes ont été ensuite retenues (*A*=300 mm, K_L=600 h). Les paramètres restant (K_r, K_g et K_n) ont été calibrés de façon à ce que le modèle reproduise l'évolution temporelle des débits horaires observés et en particulier les crues. Dans le cas de certains bassins versants au régime perturbé, les paramètres de transfert ont pu être calés sur les crues exceptionnelles de 1987 et 1993 préliminairement reconstituées par le SHN (Service Hydrologique National) (OFEG, 2002). Pour chacun de ces paramètres de transfert, une relation régionale a pu être identifiée (Eq.(16)).

$$K_R = K_{R0}\left(\frac{S}{S_0}\right)^{0.5}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{-0.5} \qquad (16)$$

Où *S* est la surface du bassin en km^2, *p* la pente du bassin en m/m, K_{R0} le paramètre d'échelle, i.e., la constante de récession pour un bassin versant de référence de surface S_0=100 km^2, et de pente p_0=0,5m/m (K_{R0}= 13,7 heures).

Performance du modèle. La performance du modèle hydrologique est très bonne pour la reproduction de l'évolution temporelle des débits sur les périodes de N années utilisées soit pour le calage soit pour la validation des paramètres. Le critère de Nash est supérieur à 0,7 pour les bassins non-glaciers, et à 0,9 pour les bassins glaciers (la valeur optimale du critère de Nash [Nash et Sutcliffe, 1970] est 1). Pour la reconstitution de crues individuelles telles que les crues extrêmes de 1987, 1993 ou 2000, la performance est variable suivant les événements et les bassins versants (Figure 5). Les raisons de cette performance plus modeste sont la conceptualisation imparfaite du processus pluie-débit mais aussi et surtout la méconnaissance de la variation spatiale des variables météorologiques (pluies, températures) ainsi que celle des conditions initiales du système (stocks de neige disponibles pour la fonte, état d'humidité des bassins versants...). Il est important de noter que si l'estimation des pluies de bassin est particulièrement difficile dans le contexte montagneux considéré, l'estimation des températures représentatives d'une bande d'altitude donnée l'est tout autant. Certaines vallées sont très encaissées et les phénomènes qui s'y passent peuvent de ce fait être relativement indépendants des vallées voisines. La dépendance de la température avec l'altitude obtenue sur la base des mesures effectuées aux stations du réseau au sol peut donc être fréquemment mal estimée ce qui peut par suite conduire à une mauvaise estimation de l'altitude du 0 °C ou de l'altitude de la limite des chutes de neige.

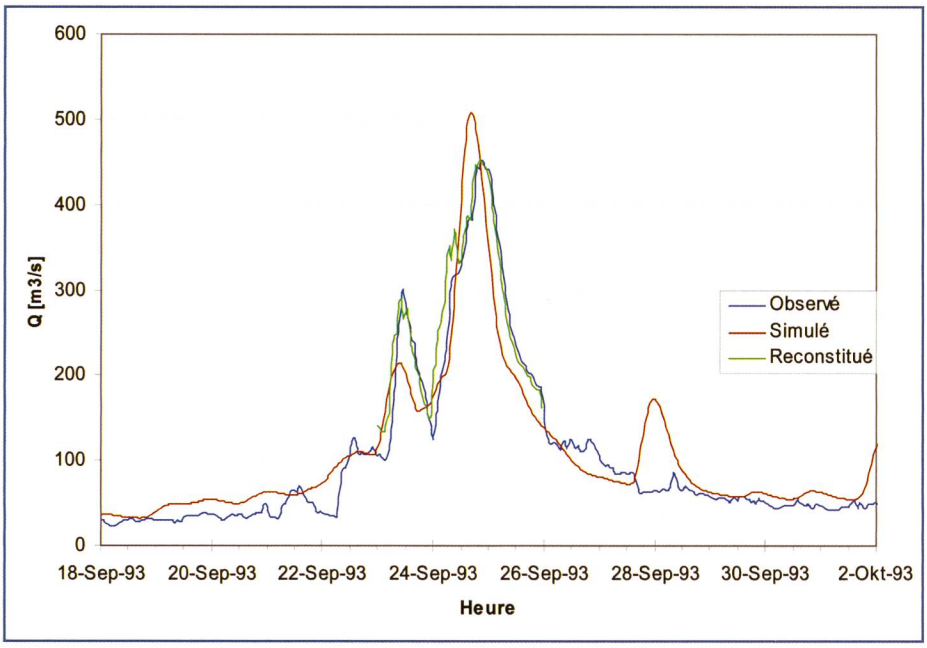

Figure 5. Hydrogramme reconstitué et hydrogramme simulé pour la crue de septembre 1993 (Rhône à Brigue).

5. Mise à jour du modèle hydrologique

Quelque soit le modèle de prévision hydrologique mis en place, une prévision de débit est toujours plus ou moins entachée d'erreurs lorsqu'elle est confrontée a posteriori avec les valeurs des débits observées. Ceci provient des diverses sources d'erreurs mentionnées précédemment, mais aussi 1) des approximations induites par la nécessaire transposition spatiale, pour les bassins non jaugés, des paramètres hydrologiques obtenus par calage pour les bassins jaugés, ainsi 2) de la méconnaissance des flux dérivés ou des consignes de gestion effectuées sur les ouvrages hydrauliques pendant la période considérée.

Si les erreurs observées a posteriori ne sont pas utilisées pour corriger, en temps réel, le système de prévision, une dérive, c'est à dire une dégradation progressive de la prévision est possible. Différentes techniques ont été décrites dans la littérature scientifique pour gérer ces erreurs (Fortin et al., 1997).

Les quatre principales consistent soit 1) en une extrapolation dans le futur des erreurs observées dans le passé proche ou 2) un recalage permanent des paramètres du modèle hydrologique ou 3) une correction des données d'entrée du modèle (lames d'eau précipitées, température, gradients de température) ou finalement 4) une mise à jour des variables d'état (*MAJ des v.e.*) du modèle hydrologique. En raison de la complexité du système modélisé, certaines de ces techniques sont en fait ici soit inapplicables soit non pertinentes: 1) une extrapolation dans le futur des erreurs observées dans le passé proche est possible pour les bassins jaugés mais une transposition spatiale des extrapolations est nécessaire pour les bassins non-jaugés. Le nombre très restreint de bassins jaugés sur le bassin du Rhône rend l'application de cette technique plutôt hasardeuse. 2) La procédure mise au point dans le cadre de ce projet pour l'estimation des paramètres du modèle hydrologique est délicate et fastidieuse tant pour les bassins jaugés (calibration) que pour les bassins non-jaugés (transposition spatiale). Le recalage permanent des paramètres du modèle hydrologique est donc aussi inapplicable pour le système étudié. 3) Corriger les précipitations utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique est une technique fréquemment utilisée pour gérer les erreurs constatées a posteriori entre débits observés et débits simulés. Une part significative des erreurs provient en effet souvent de la mauvaise estimation des lames d'eau précipitées sur les bassins considérés. Les débits sont cependant aussi fortement conditionnés par l'état initial du système. En milieu alpin, la température peut de plus influencer les débits autant que les précipitations. Les erreurs possibles quant à l'estimation de l'une ou l'autre de ces différentes variables (précipitations, température, conditions initiales) sont potentiellement aussi importantes et ont potentiellement autant d'influence sur la précision de la prévision. La nature des corrections à appliquer à l'une et l'autre de ces variables devient de ce fait très hasardeuse. 4) La technique basée sur une mise à jour des variables d'état du modèle hydrologique présente aussi un certain nombre de limitations mais elle s'avère être la seule technique raisonnable pour gérer les erreurs constatées a posteriori entre débits observés et simulés (Hamdi et al., 2005). Plusieurs stratégies de MAJ des v.e. sont en fait possibles. La stratégie retenue pour Minerve, actuellement en phase de développement et d'évaluation, est décrite ci dessous.

La MAJ des v.e. peut se faire pour tout bassin versant pour lequel on dispose d'un débit mesuré. Supposons que le débit $Q_m(t)$ mesuré au temps t à l'exutoire de ce bassin est composé des débits inconnus $Q_k(t)$ provenant de N sous bassins amont non-jaugés ainsi que d'un débit $Q_j(t)$ connu provenant de P sources mesurées (bassins amont jaugés, turbinages, débits dérivés). La procédure de MAJ des v.e. du système consiste alors à corriger les contributions simulées des différents sous bassins non-jaugés de sorte que le nouveau débit total simulé $Q^*_s(t)$ corresponde au débit observé.

$$Q_s^*(t) = \sum_{k=1}^{N} (1+\varepsilon_k(t)).Q_k(t) + Q_j(t) \qquad (17)$$

où $\varepsilon_k(t)$ est le coefficient de correction à appliquer à la contribution du $k^{ème}$ sous-bassin versant amont non-jaugé. Le coefficient de correction est dépendant du temps et peut être en principe différent d'un sous-bassin versant à un autre. Par soucis de simplification, une valeur unique est retenue pour l'ensemble des bassins versants non-jaugés situés à l'amont du point de contrôle considéré. Cela implique que les corrections relatives sur les débits (en %) seront identiques sur tous les bassins versants a contrario des corrections absolues (en m^3/s): une correction absolue sera d'autant plus forte sur le débit produit par un bassin donné que sa contribution au débit total sera forte. En d'autres termes, si le débit observé à la station de mesure est de n% supérieur au débit total simulé, la procédure conduit à augmenter artificiellement les contributions des différents sous-bassins amont de n% de sorte que la somme des contributions mises à jour soit n% supérieure à celle initialement simulée. Cette procédure suppose donc que la répartition spatiale des contributions de bassins simulées par le modèle hydrologique est raisonnable.

Pour chaque sous-bassin, la procédure consiste ensuite à corriger la valeur des niveaux d'eau stockée dans

7-7-87	18-7-87	24-8-87	17-6-91	24-9-93	27-6-94	03-7-95	22-7-95	03-6-99

Tableau 1. Dates des événements sélectionnés pour illustrer la performance du modèle.

les différents réservoirs conceptuels du modèle hydrologique de sorte que le nouveau débit simulé à l'exutoire du bassin corresponde au débit cible. Ce débit cible est le débit observé lorsque le bassin est jaugé ou le débit corrigé suivant le principe exposé ci-dessus lorsque le bassin est non-jaugé. Un nombre infini de stratégies de correction permet à nouveau de produire pour le bassin d'intérêt un débit simulé identique au débit cible. Pour réduire la complexité de l'opération nous avons de nouveau considéré en première approximation que la correction à apporter à chaque réservoir devait être proportionnelle au débit produit par ce réservoir. Ceci repose sur l'hypothèse que le modèle hydrologique simule raisonnablement les différentes composantes de l'écoulement.

Les hypothèses sous-tendues par cette procédure sont bien entendu fortes mais conduisent, au vu de la faible quantité d'informations disponibles sur le comportement du système, à une procédure raisonnable de MAJ du modèle. Malgré l'apparente simplicité de la procédure, sa mise en œuvre reste complexe du fait de l'arrivée décalée, en une station de contrôle donnée, des contributions des bassins amont. Lorsqu'une correction est nécessaire à la station de contrôle à l'instant HH0, une MAJ des v.e. doit être opérée à des instants antérieurs différents suivant l'éloignement temporel des bassins contributifs.

Au vu des différentes hypothèses et simplifications retenues pour la mise en place de cette procédure, les corrections successives pourraient conduire dans certains des réservoirs conceptuels du modèle à une dérive abhérente des stocks d'eau corrigés. Pour éviter de telles situations, la procédure de MAJ des v.e. est seulement activée pendant les périodes d'alarme hydro-météorologique. Pour les situations hydro-météorologiques courantes (la majeure partie du temps), le modèle hydrologique produit en continu des débits en tout point du système sur la base de la météorologie observée mais le modèle n'est pas corrigé.

Performance du modèle de prévision. Pour analyser la performance du modèle de prévision, trois aspects sont considérés:

- La précision du modèle, i.e., sa capacité à prévoir les débits moyens sur différentes durées d'intégration (Tc) et pour différents temps d'anticipation (Ta).
- La robustesse de la procédure de MAJ des v.e., i.e., la stabilité temporelle des corrections opérées sur les variables d'état.
- L'intérêt de la procédure de MAJ des v.e., i.e., le gain de performance obtenu par rapport à une prévision effectuée sans MAJ des v.e.

Une illustration des résultats obtenus avec cette procédure de correction est donnée (Figure 6) pour les 9 événements de crues indépendants du tableau 1. Pour chaque événement la prévision est réalisée sur une fenêtre de 11 jours centrée sur la pointe de crue. La fréquence de la MAJ des v.e. est horaire. Lorsque la procédure de MAJ des v.e. est utilisée, la performance du modèle décroît avec le délai d'anticipation des débits. La performance est en revanche indépendante du délai d'anticipation lorsque la procédure de MAJ est désactivée. La figure illustre aussi l'intérêt de la MAJ des v.e. qui permet de réduire les incertitudes sur la prévision.

6. Incertitudes sur la prévision

Pour être intéressante, une prévision de débit devrait en principe indiquer la prévision la plus probable de la variable hydrologique d'intérêt (débit) et donner de plus une information permettant d'évaluer l'incertitude liée à cette estimation. La méthode idéale devrait intégrer d'une part les incertitudes sur la prévision météorologique (incertitudes sur les précipitations et les températures tant en intensités qu'en distributions spatiales et temporelles) et d'autre part les incertitudes dues à la modélisation hydrologique elle-même. Dans le cadre de Minerve 2, les incertitudes relatives aux intrants et à la prévision météorologique en particulier sont exclues de l'analyse: seules les incertitudes liées au modèle hydrologique sont caractérisées. Elles sont illustrées pour l'exemple précédent par les différents graphiques du panneau droit de la (Figure 6). L'intégration des incertitudes liées à la prévision mé-

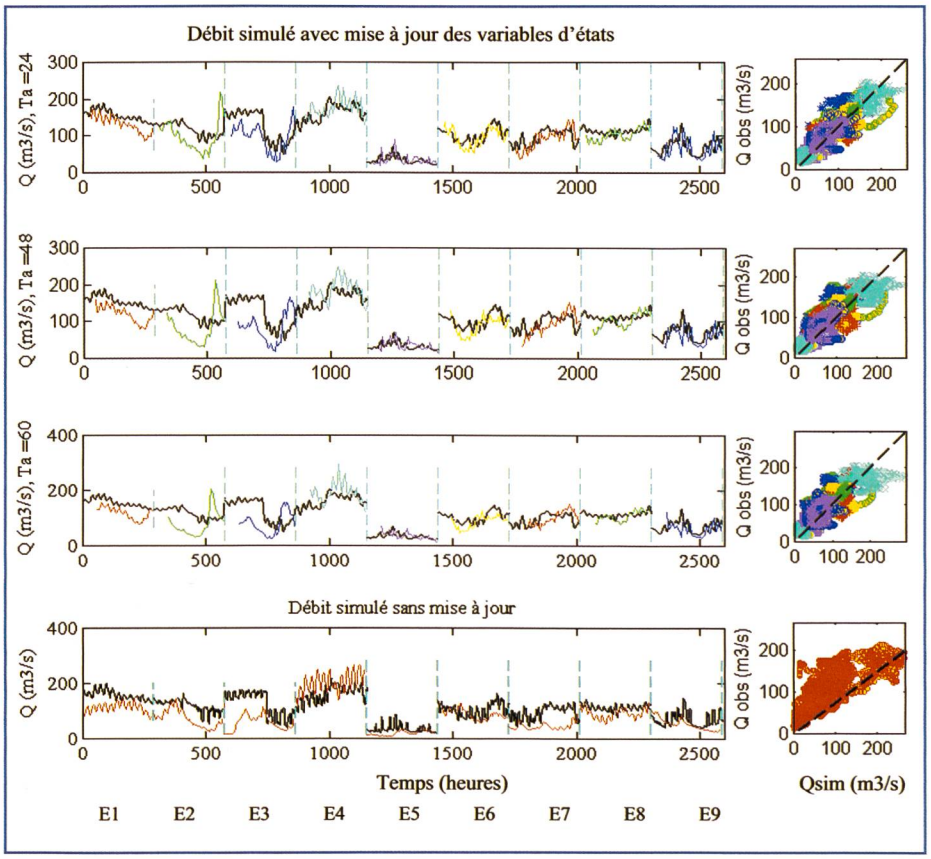

Figure 6. Débits horaires observés (courbe noire) et prévus (courbes en couleur) pour différents temps d'anticipation. Résultats du modèle de prévision à Brigue. De haut en bas: résultats avec MAJ des v.e. (temps d'anticipation de 24, 48 et 60 heures); en bas: débit simulés sans MAJ des v.e. Graphiques de gauche: évolution temporelle des débits pour les 9 événements sélectionnés. Graphiques de droite: débits observés fonction des débits prévus.

téorologique, opération essentielle si l'on souhaite donner une gamme d'incertitude réaliste sur les débits prévus, sera effectuée lors des développements ultérieurs du projet. La possibilité d'utiliser les prévisions d'ensemble des modèles météorologiques sera analysée dans un tel contexte avec intérêt.

7. Conclusion

Pour prévoir les débits de crue du Rhône en Suisse, l'Hydram a développé une modèlisation hydrologique conceptuelle adaptée au milieu alpin considéré. La modélisation permet en particulier de simuler les débits provenant des précipitations liquides, de la fonte de neige et de la fonte glaciaire. Elle permet aussi d'estimer l'évolution temporelle des stocks de neige sur chaque bande d'altitudes des différents sous-bassins utilisés pour la discrétisation du système.

La performance du modèle hydrologique est très bonne pour la reproduction de l'évolution temporelle des débits sur plusieurs saisons. Pour la reconstitution de crues individuelles, la performance est variable suivant les événements et les bassins versant. Les raisons de cette performance modeste sont la conceptualisation imparfaite des processus hydrologiques en jeu mais aussi et surtout la méconnaissance de la variation spatiale des variables météorologiques (pluies, températures), l'incertitude majeure sur la limite pluie/neige et sur l'altitude de l'isotherme 0 °C ainsi que la méconnaissance des conditions initiales du système (stock de neige disponible pour la fonte, état d'humidité des bassins versants...). Une procédure de mise à jour des variables d'état du modèle hydrologique a de ce fait été développée pour permettre de gérer au mieux les erreurs constatées a posteriori entre les débits observés et les débits simulés. Cette procédure qui a montré tout son intérêt pour différents bassins versants au régime hydrologique non-perturbé est en cours de développement et d'évaluation pour le système complet. Le système de prévision en temps réel, qui sera testé en mode opérationnel à partir de janvier 2006, intègrera par ailleurs les développements réalisés par les autres partenaires du projet et liés par exemple à la modélisation des composantes hydrauliques du système (fonctionnement des aménagements, propagation des crues dans le réseau hydrographique) ou à l'élaboration d'un système expert pour la proposition de stratégies de gestion optimales des ouvrages en cas de situation hydro-météorologique à risque.

Remerciements

Le projet Minerve est un mandat de l'état du Valais financé par le Service des routes et cours d'eau avec la participation du Services des Forces Hydrauliques du canton du Valais et par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie. Les champs de prévision des variables météorologiques sont fournis gratuitement par MétéoSuisse pendant la phase de développement du projet.

Bibliographie

Boillat, J.-L. 2005. L'influence des retenues valaisannes sur les crues. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la IIIème correction du Rhône. Communication N° 21 pp. 87–101, LCH, 9 juin, Martigny.

Consuegra, D., Niggli, M., Musy, A. 1998. Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au bassin versant supérieur du Rhône. Eau Energie Air, 9/10, 223–231.

Dubois, J. 2005. Nouvel outil de modélisation des systèmes hydrauliques complexes, Routing System II. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la IIIème correction du Rhône. Communication N° 21, pp. 133–147, LCH, 9 juin, Martigny.

Edijatno et Michel, C. 1989. Un modèle pluie-débit journalier à 3 paramètres. La Houille Blanche, 2, 113–121, 1989.

Faivre, G. 2004. Etude comparative de méthodes de spatialisation des précipitations en région montagneuse. Application à la région du Valais. Travail de diplôme. Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne.

Fortin, V. 1999. Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application. Institut de recherche d'Hydro-Québec. Montréal, Canada. 68p.

Fortin, V., Ouarda, B.M.J., Rasmussen, P.F., Bobee, B. 1997. Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Rev. Sci. Eau, 4. 461–487.

Grabs, T. 2005. Distributed snow modeling in a boreal landscape. Validation of snow models based on runoff measuremnt at different scales. Travail de diplôme. Swedish University of Agricultural Sciences, Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne.

Hamdi, Y., Hingray, B., Musy, A. 2005. Prévision hydro-météorologique pour les crues du Rhône à l'amont du Léman. Volet B: Modèle hydrologique. Rapport intermédiaire du projet Minerve. Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne.

Jordan, F., Boillat, J.-L., Ulrich, D., Hingray, B., Hamdi, Y. 2002. Minerve, a Tool for Flood Prediction and Management in Wallis. Mountains, Sources of water, sources of knowledge. International Conference IUKB, Oct. 2002, Sion, Switzerland.

Jordan, F. 2005. Gestion des crues par opérations préventives sur les aménagements hydroélectriques. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la IIIème correction du Rhône. Communication N°21, pp. 121–132, LCH, 9 juin, Martigny.

Kuchment, L.S., Gelfan, A.N. 1996. The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modeling river runoff generation. J. of Hydrol. 179 (1-4): 23–36.

Mtir, A. 2004. Modélisation d'un système de prévision de crues pour les différents affluents du Rhône à l'amont du Léman. Travail de diplôme. Laboratoire d'Automatique, Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I, a discussion of principles. J. Hydrol., Amsterdam, The Netherlands, 10 (3), pp. 282–290.

OFEG. 2002. Les Crues 2000. Rapports de l'OFEG. Série Eaux. N° 2. Bern.

Peissard, L. 2003. Modélisation de la fonte de la neige et de la contribution glaciaire sur différents bassins versants en Valais. Travail de diplôme. Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne.

Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., Musy, A. 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. Hydrol. Earth Syst. Sci., 9, 95 – 109.

Schaefli, B. 2005. Quantification of modeling uncertainties in climate change impact studies on water resources: application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps. PhD Thesis N° 3225. EPFL, Lausanne (disponible en ligne: http://library.epfl.ch/theses).

Spreafico, M., Weingartner, R., Leibundgut. C. 1992. Atlas Hydrologique de la Suisse. Service Hydrologique et Géologique National. SHGN. Bern.

Adresse des auteurs

Dr. *Yasser Hamdi*, Dr. *Benoît Hingray*, Prof. *A. Musy*

Laboratoire Hydrologie et Aménagments (Hydram)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Bât. GR, Station 2

1015 Lausanne, Suisse

+41-21-693 37 34

http://hydram.epfl.ch

benoit.hingray@epfl.ch, andre.musy@epfl.ch