

# MINERVE 2010 : prévision hydrométéorologique et gestion de crues sur le Rhône alpin

Autor(en): **Hernández. Javier Garcia / Horton, Pascal / Tobin, Cara**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **101 (2009)**

Heft 4

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941958>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# MINERVE 2010: Prévision hydrométéorologique et gestion de crues sur le Rhône alpin

■ Javier García Hernández, Pascal Horton, Cara Tobin, Jean-Louis Boillat

## Résumé

L'objectif prioritaire du projet de 3<sup>ème</sup> Correction du Rhône est d'améliorer la protection de la Vallée du Rhône en amont du lac Léman contre les crues. Dans ce contexte, le projet MINERVE vise à optimiser la gestion des flux hydrauliques, en profitant du réseau d'aménagements hydroélectriques existant sur le bassin versant. Pour ce faire, un modèle de prévisions hydrométéorologiques et un modèle d'aide à la décision pour l'exploitation préventive des aménagements sont développés.

## 1. Introduction

Le bassin versant du Rhône alpin possède une surface de 5520 km<sup>2</sup> (Figure 1). Il est caractérisé par la présence de nombreux aménagements hydroélectriques dont le débit équipé total est de 350 m<sup>3</sup>/s environ. Les plus importants sont dotés de bassins d'accumulation d'un volume total supérieur à 1195 Mio m<sup>3</sup> (Meile et al., 2005).

Sur ce bassin versant, les crues de 1987, 1993 et 2000 ont rappelé l'importance 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 météorologiques.

Le projet MINERVE (Boillat, 2005) poursuit les objectifs de gestion préventive des crues et de déclenchement d'alertes selon le schéma de la Figure 2. Il s'appuie

sur un outil de simulation hydrologique basé sur les prévisions météorologiques et sur un outil d'aide à la décision qui propose des scénarios de turbinage et de vidange préventifs pour optimiser 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.

## 2. La prévision météorologique

### 2.1 Prévisions météorologiques COSMO de MétéoSuisse

MétéoSuisse fournit les prévisions météorologiques produites par le «Consortium for Small-scale Modeling» (COSMO). Les caractéristiques des modèles actuels sont résumées dans le Tableau 1.

Le modèle MINERVE exploite les

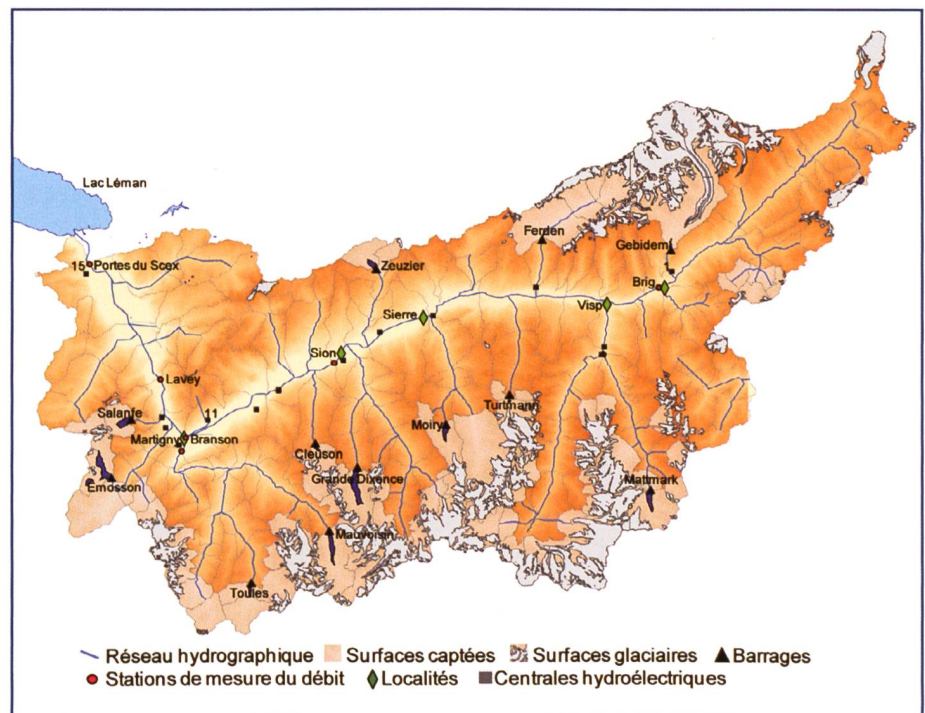


Figure 1. Bassin versant du Rhône en amont du Léman avec les principales retenues et les centrales hydroélectriques.

	COSMO-LEPS	COSMO-7	COSMO-2
Type de prévision	Probabiliste (16 membres)	Déterministe	Déterministe
Résolution	10 km	6.6 km	2.2 km
Niveaux verticaux	40	60	60
Echéance de prévision	0-132 h	0-72 h	0-24 h
Résolution temporelle	3 h	1 h	1 h
Réactualisation	24 h	12 h	3 h

Tableau 1. Caractéristiques des différents modèles COSMO de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie.

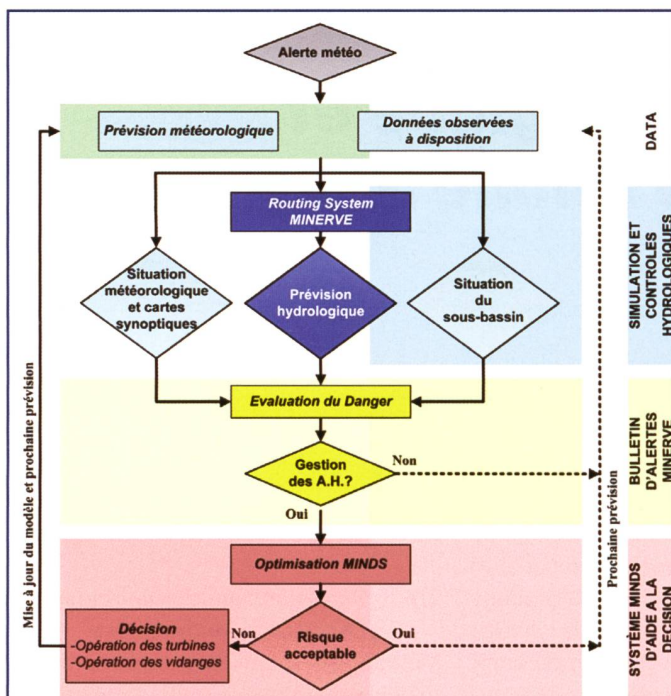


Figure 2. Schéma opérationnel de MINERVE.

prévisions météorologiques déterministes provenant du modèle COSMO-7. Cette prévision est établie à partir du modèle global CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme) et couvre la majeure partie de l'Europe occidentale et centrale. Pour les prévisions à plus court terme, les prévisions déterministes COSMO-2 sont également utilisées. Elles sont alimentées initialement par COSMO-7 et couvrent avec une résolution plus fine la région alpine, avec la Suisse au milieu.

De plus, les prévisions météorologiques d'ensemble COSMO-LEPS (Limited-area Ensemble Prediction System) sont également exploitées. Ce modèle fournit des prévisions à très haute résolution sur un ensemble de scénarios pour l'Europe centrale et méridionale. Les 16 scénarios retenus sont une sélection représentative des prévisions d'ensemble du modèle global CEPMMT, lesquelles sont utilisées pour l'initialisation et le calcul des conditions de bord de COSMO-LEPS. Le but de COSMO-LEPS est l'amélioration des prévisions d'événements extrêmes 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., 2007).

### 2.3 Prévision par adaptation statistique

Une approche alternative aux prévisions météorologiques fournies par Météo-

Suisse est également en développement. Il s'agit d'une méthode d'adaptation statistique ayant pour but de contourner les difficultés de la simulation des processus physiques générant les précipitations, dont le niveau de détail est encore trop faible pour estimer précisément la localisation des événements extrêmes. Cette difficulté est liée au fait que les précipitations sont de nature stochastique et engendrées par des processus physiques complexes, difficilement reproductibles par les modèles numériques (Deidda, 1999). Il en résulte de grandes incertitudes, particulièrement dans un environnement complexe comme celui des bassins versants alpins.

L'adaptation statistique combine les deux approches de la prévision déterministe et de la prévision statistique. Elle se base sur les prévisions de la circulation atmosphérique générale et crée une relation statistique entre cette circulation et le temps sensible (précipitation et température) mesuré aux stations météorologiques (Wetterhall, 2005). Elle permet donc de prévoir le temps localement à partir de données générales considérées comme fiables (Bontron, 2004; Glahn et Lowry, 1972). Une telle méthode s'appuie sur l'hypothèse qu'une relation dominante entre le temps sensible et les variables globales existe et subsiste en dehors de la période sur laquelle elle a été établie (Hewitson et Crane, 1996).

Le bassin alpin du Rhône est très sensible à certaines situations météoro-

logiques. Il est ainsi connu que la région Binn-Simplon est particulièrement exposée à des précipitations extrêmes lors de remontées de masses d'air humide depuis le Sud accompagnées d'un courant jet en haute altitude. L'existence de ce lien entre la circulation générale et le temps sensible est mise en évidence sur la Figure 3, qui illustre les trajectoires inverses des masses d'air à 500 hPa (environ 5500 m) pour les jours de pluie avec plus de 100 mm à la station de Binn.

Les approches d'adaptation statistique peuvent être classifiées en plusieurs groupes (Bárdossy, 2000; Xu, 1999). L'une d'elle est la méthode des analogues (Figure 4), qui suppose une analogie entre la situation météorologique du jour à prévoir et les situations passées de même nature (Obléd et al., 2002). Le temps sensible associé aux situations passées est alors utilisé en tant que prévision (Wetterhall, 2005).

Une telle approche permet de confirmer ou d'infirmer les prévisions des modèles météorologiques numériques et donc d'accroître la confiance dans le système prévisionnel en général.

## 3. La modélisation hydrologique

### 3.1 Le modèle GSM-SOCONT

Le bassin versant du Rhône a été discrétisé en 239 sous-bassins versants d'une surface moyenne de 23 km<sup>2</sup>, de manière

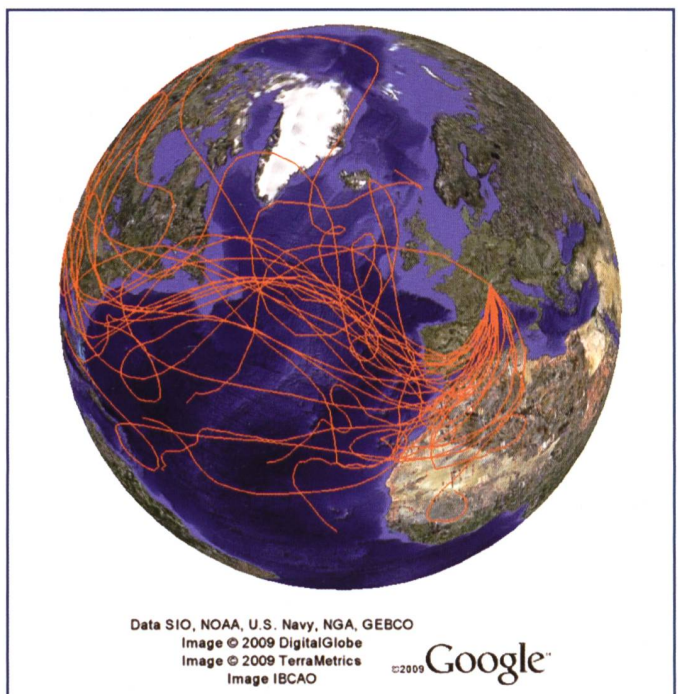


Figure 3. Illustration des trajectoires inverses des masses d'air à 500 hPa correspondant aux jours de pluie avec plus de 100 mm à la station de Binn.

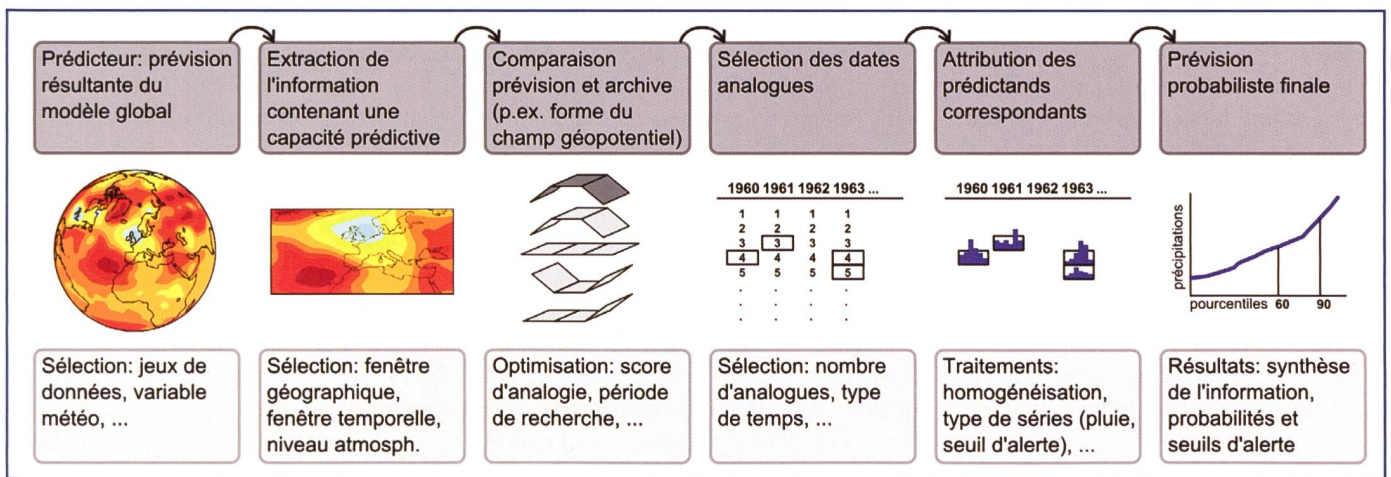


Figure 4. Illustration des étapes successives de la méthode des analogues.

à tenir compte des nombreux ouvrages de captage situés en altitude. Le concept du modèle hydrologique (Figure 5), développé pour estimer les apports de chaque sous-bassin (Hamdi et al., 2005), se base sur les modèles Socont (Bérod, 1994) et GSM-Socont (Schaeffli et al., 2005; Hingray et al., 2006). La propagation des débits dans le réseau hydrographique est effectuée avec un modèle de propagation d'onde cinématique.

Pour la modélisation hydrologique, les sous-bassins versants d'altitude sont divisés en une région glaciaire et l'autre non glaciaire, toutes deux découpées en bandes d'altitude. Pour chaque bande, un modèle de neige, composé d'un double réservoir (neige et eau liquide contenue dans la couche de neige), permet de suivre l'évolution temporelle de la hauteur de neige et de son degré de saturation. Les précipitations et températures horaires sont adaptées à chaque bande d'altitude. La précipitation est interpolée à partir des stations météorologiques disponibles, en fonction inverse du carré de la distance au centre de gravité de la bande d'altitude. La température est calculée en considérant un gradient constant à partir de la température au sol. Les valeurs de précipitation et température sont appliquées uniformément à la bande d'altitude. La fonte de neige, calculée selon une formule de type degré-jour, produit une pluie équivalente à partir d'un taux de saturation seuil.

Dans les bandes non glaciaires, la pluie équivalente alimente le modèle d'infiltration et de transfert. Celui-ci est composé de deux réservoirs non-linéaires en parallèle, produisant respectivement les composantes lente et rapide de l'écoulement à l'exutoire du sous-bassin en provenance de la bande. Dans une bande glaciaire, 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. Le débit total d'un sous-bassin versant est ainsi la somme des diverses contributions de chaque bande d'altitude.

### 3.2 Discussion et amélioration du modèle

La difficulté à simuler l'hydrologie d'une région alpine est intensifiée par plusieurs facteurs. Les bassins versants sont relativement grands, avec une aire de 700 km<sup>2</sup> en moyenne, ils ont une distribution d'altitude entre 600 et plus de 4000 mètres, une couverture glaciaire significative (20 pourcent en moyenne) et un réseau de stations météorologiques éparses (peu de stations à plus de 3000 mètres). En raison d'effets orographiques, les précipitations intenses sont généralement occasionnées par une baisse de température et une condensation résultant de l'advection d'humidité par dessus le relief montagneux. C'est pour-

quoi une grande partie des précipitations tombe sous le vent et une autre partie sur le versant arrière. Le réseau météorologique ne permet pas d'identifier les effets orographiques à proximité des sommets où tombe la majeure partie de la précipitation à cause d'une sous-représentation de pluviomètres à haute altitude (Frei et Schär, 1998).

La température est déterminante pour définir si la précipitation tombe sous forme liquide ou sous forme de neige. Pour l'interpolation de la température, le modèle GSM-SOCONT utilise actuellement un gradient altimétrique constant de -0.6 °C/100 m. Cette hypothèse simplificatrice introduit une erreur sur l'estimation de l'altitude de l'isotherme 0 °C qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Généralement, elle surestime le gradient réel en été et le sous-estime en hiver. Dans certaines régions, notamment sur les bassins versants de la Dranse et de la Viège, le modèle actuel sous- ou surestime les pics des hydrogrammes, révèle une faible saturation initiale et s'appuie sur une in-

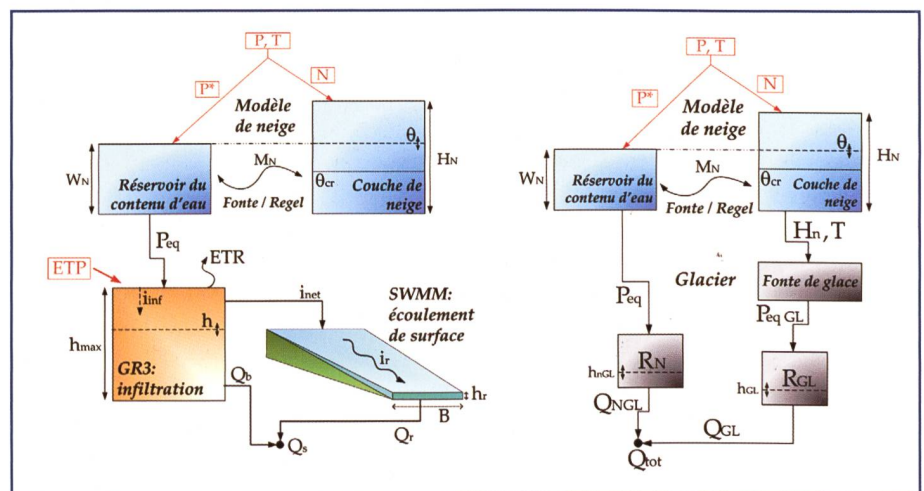


Figure 5. Concept de modélisation hydrologique des parties non-glaciaires (à gauche) et glaciaires (à droite). Les différents paramètres et modèles sont décrits dans Garcia et al. (2007).

terpolation spatiale peu précise de la précipitation.

Pour améliorer le modèle, une analyse est effectuée sur les mesures de vent, de radar et sur les prévisions météorologiques. Les effets orographiques dominants sont incorporés dans une analyse d'interpolation incluant les informations secondaires issues du radar, des mesures de vent et de l'advection d'humidité. De façon similaire, l'information issue des prévisions COSMO-7 est aussi exploitée pour l'interpolation de la température et de la précipitation.

Une analyse des situations météorologiques des fortes crues depuis 1987 montre que la plus grande partie de l'advection d'humidité vient du sud-est, en provenance de la mer Méditerranéenne. Les données des radiosondages ont été analysées pour tous les événements à Payerne et Milan, stations situées respectivement à l'ouest et au sud-est du Rhône alpin. Les deux stations montrent des champs de vent similaires. Dans les deux cas, les vents à 500 hPa viennent du sud à environ 25 mètres par seconde. Ces vents sont responsables de l'advection d'humidité sur les cols du Grand St. Bernard et de Saas. Ces cols se situent environ 1000 mètres plus bas que les sommets tels que le Cervin, qui bloquent les vents du sud-est. Les données des prévisions COSMO-7 montrent des vents similaires en vitesse et en direction que ceux des radiosondages (Figure 6, gauche).

Pour toutes les analyses de

COSMO-7, les données ont été considérées dans la situation de «hind-casting» où les prévisions des 12 premières heures sont retenues à chaque réactualisation. Cela permet de constituer la prévision optimale pour un meilleur calage des champs de vent, de précipitation et de température.

Toutes les données des stations ANETZ/IMIS au sol, des trois stations radar existantes et des prévisions COSMO-7 présentent chacune des qualités et des défauts. Afin de tirer le meilleur de chacune, ces différents types d'information sont analysés pour être intégrés dans GSM-SOCONT.

Les intensités fournies par le radar sont significativement inférieures à celles mesurées au sol par les stations pluviométriques, en partie à cause de l'obstruction partielle ou complète du faisceau radar et de la présence d'échos du sol (Joss et al., 1999). Les trois radars MétéoSuisse de Genève (La Dôle), Zurich (Albis) et Tessin (Lema) ne permettent pas d'obtenir de bonnes mesures des précipitations en Valais à cause des montagnes et du relief qui contaminent fortement le signal. Cependant, les produits RAIN et OVERVIEW générés par MétéoSuisse à partir des radars peuvent être utilisés comme référence pour la répartition spatiale.

En s'appuyant sur une connaissance locale et sur les données au sol, une étude conduite par des experts (Petrascheck et al., 2002) montre que le bassin versant de Saas a reçu environ deux fois

plus de précipitation que celui de Zermatt en octobre 2000. La prévision COSMO-7 confirme cette tendance (Tableau 2). Cette augmentation du volume précipité est expliquée par l'advection de l'humidité et les effets orographiques.

Les données COSMO-7 et les mesures du réseau ANETZ/IMIS ont été interpolées avec la pondération classique selon l'inverse de la distance au carré (IDW). Les données COSMO-7 et des radars et ont été évaluées par leur moyenne spatiale (AvAire).

Dans les régions alpines, un biais de 4 à 6 °C est commun pour les prévisions de température aux points de maillage, où le modèle d'altitude est significativement différent de l'altitude réelle (Eccel et al., 2007). Actuellement, une nouvelle méthode d'interpolation des précipitations et de la température est en développement. Dans la littérature, la méthode la plus aboutie est le krigeage avec dérive secondaire, «Kriging with External Drift» (Haberlandt, 2007; Velasco-Forero, 2009). A terme, les données corrigées seront intégrées dans la simulation GSM-SOCONT.

#### 4. La prévision hydrologique et la gestion d'alertes

##### 4.1 La prévision hydrologique multiple

Pour transformer les prévisions météorologiques en débit, le modèle GSM-Socont décrit ci-dessus est utilisé. Ce modèle est intégré dans l'outil de simulation hydrologique et hydraulique Routing System (García et al., 2007). Ce logiciel, conçu pour simuler la formation et la propagation des écoulements dans des systèmes à surface libre, permet la prise en compte des processus hydrologiques, le routage dans les retenues, les galeries 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 appelé MINERVE. Il est capable d'établir la prévision de crues en temps réel, couplant les informations météorologiques avec le modèle hydrologique et de transfert. Le suivi en temps réel des écoulements peut également être fait sur la base des mesures enregistrées, également utilisées pour la mise à jour des variables d'état du modèle, et ainsi éviter la dérive de la prévision hydrologique. Un exemple d'hydrogrammes résultant d'une prévision d'ensemble COSMO-LEPS est présenté à la Figure 7.

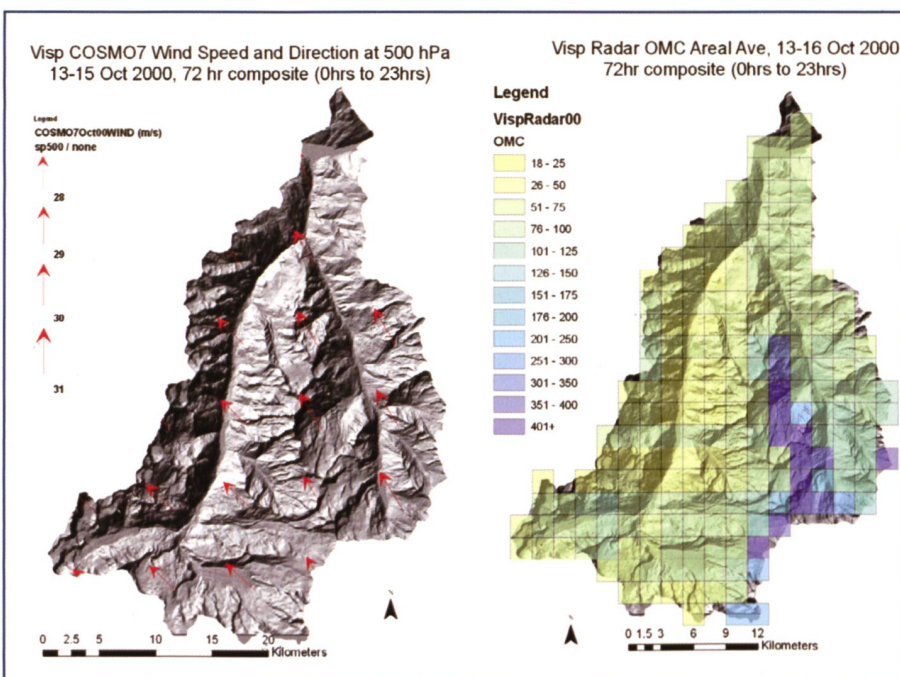
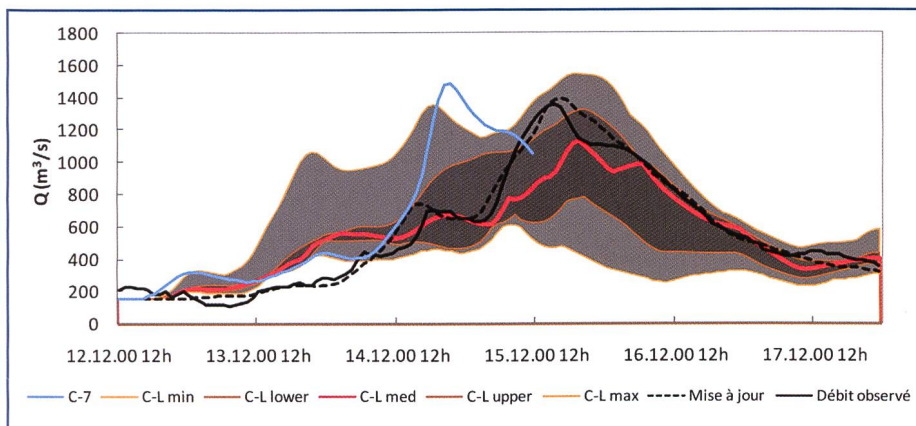


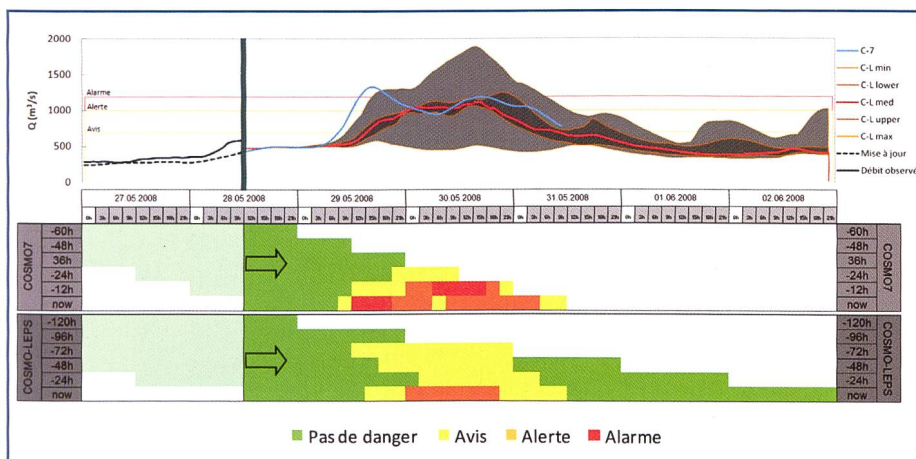
Figure 6. Les vents moyens (m/s) sur le bassin versant de la Viège pendant la crue d'octobre 2000 issus du bulletin MétéoSuisse à gauche). Champ de précipitation totale produit par le radar sur la Viège du 13 au 16 octobre 2000 (à droite).

	Précipitation cumulée			
	AvAire_COSMO7	IDW_COSMO7	IDW_ANETZ	AvAire_Radar_OMC
Viège en bas	180	184	207	82
Saas	402	417	319	269
Zermatt	192	202	217	137

**Tableau 2. Précipitation cumulée sur 72 heures durant la crue du 13 au 16 octobre 2000. Comparaison des valeurs obtenues par moyenne surfacique (AvAire) et pondérée (IDW) à partir des prévisions COSMO-7, des valeurs mesurées sur le réseau ANETZ/IMIS et des radars.**



**Figure 7. Préviction hydrologique d'ensemble à la Porte du Scex à partir de la prévision météorologique COSMO-LEPS du 12.10.2000 à 12 h. COSMO-LEPS est caractérisé par différents hydrogrammes représentant la médiane (C-L med), les quartiles supérieur (C-L upper) et inférieur (C-L lower) et les extrêmes (C-L max et C-L min) de l'échantillon de prévision. La simulation avec prévision parfaite, basée sur les mesures météorologiques et utilisée pour la mise à jour du modèle hydrologique (Mise à jour) ainsi que le débit observé sont présentés pour la comparaison.**



**Figure 8. Bulletin d'alerte MINERVE à la Porte du Scex du 28.05.2008 à 12 h 00 avec les prévisions d'ensemble COSMO-LEPS et déterministes COSMO-7.**

#### 4.2 Evaluation du risque et bulletin d'alerte

L'analyse de risque permet de connaître la rationalité d'une décision, ce qui est particulièrement important pour les prévisions de crues associées à des prévisions hydro-météorologiques incertaines. L'évaluation du risque est ainsi nécessaire en prélude à une décision. Les systèmes d'aide à la décision (Decision Support System, DSS) sont des outils conçus pour la prise de décisions fondées sur différents scénarios dépendant de valeurs estimées. Ils sont devenus incontournables pour l'optimisa-

tion des réseaux complexes de réservoirs à objectifs multiples, dédiés à la production d'électricité, l'approvisionnement en eau ou le contrôle des crues.

Les prévisions d'ensemble de type COSMO-LEPS apportent un éclairage nouveau à cette question, avec certains avantages potentiels. Elles permettent une évaluation de l'incertitude associée aux événements considérés qui peut par la suite être utilisée pour l'évaluation et la gestion des aménagements ou pour le déclenchement d'alertes d'inondation, en rendant possible la prise en compte d'un risque probable.

Avant le lancement du modèle d'aide à la décision, le bulletin d'alerte MINERVE (Figure 8) montre de façon explicite l'évolution de la situation hydrologique aux différents points de contrôle du bassin versant et donne des messages d'avertissement (avis, alerte ou alarme) en fonction de différents seuils de dépassement de débit et de probabilité des prévisions d'ensemble.

Dès qu'une situation critique est identifiée, le modèle d'aide à la décision de MINERVE propose des stratégies d'intervention pour la gestion préventive des aménagements hydroélectriques dans le but d'éviter ou de réduire les inondations sur le bassin versant, en conformité à des objectifs pré-établis et en tenant compte des contraintes existantes. Le système expert (Jordan, 2007) poursuit un double but. Le premier vise à libérer préventivement un volume de stockage dans les retenues et à interrompre les opérations de turbinage et/ou de vidange durant la pointe. Le deuxième consiste à optimiser la reconstitution des stocks à la fin de la crue, de façon à éviter les pertes d'eau.

#### 4.3 Gestion des aménagements hydroélectriques

L'utilisation des aménagements hydro-électriques pour le contrôle des crues est une opération délicate. Si les objectifs du décideur sont prioritairement de limiter les pointes de débit dans les cours d'eau, ils doivent aussi considérer l'économie des moyens. Il s'agit ainsi de limiter les pertes économiques liées aux opérations préventives lors des crues, sachant que les prévisions hydro météorologiques 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.

A la fin du projet MINERVE, le système d'aide à la décision permettra d'identifier les stratégies optimales de gestion des aménagements hydroélectriques en tenant compte de scénarios probabilistes et fournira un diagnostic et des méthodes pour la gestion des crues. Ce nouveau DSS, baptisé MINDS (Minerve Interactive Decision Support) est en cours d'élaboration et intégrera systématiquement la notion d'incertitude.

#### 5. Conclusions et perspectives

Le modèle MINERVE développé pour le bassin versant du Rhône en amont du Léman est opérationnel depuis 2006. Il fonctionne de façon automatique avec

les prévisions COSMO-7 et permet de simuler les flux hydrauliques dans le réseau hydrographique et de proposer des consignes d'exploitation préventive destinées à la protection contre des inondations. Le système contribue à la prise de décisions prioritaires pour la gestion des réservoirs des grands barrages dans le but de renforcer la sécurité du territoire. Il permet également d'établir le tableau synoptique de la situation hydro-météorologique sur l'ensemble du bassin versant. Le système actuel produit des résultats satisfaisants. Néanmoins, des améliorations sont en cours de développement pour augmenter sa fiabilité et faciliter les décisions lors des événements de crue. Les prévisions d'ensemble et les prévisions d'adaptation statistique ont été introduites au projet pour obtenir un système plus robuste et plus fiable, intégrant le concept d'incertitude hydro-météorologique dans la décision. Parallèlement, le modèle hydrologique et la répartition spatiale des précipitations et des températures font l'objet d'une amélioration conceptuelle.

## 6. Remerciements

Le projet MINERVE est développé en partenariat par 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 par le Service des Eaux, Sols et Assainissement du Canton de Vaud. MétéoSuisse fournit les prévisions météorologiques et les sociétés hydroélectriques communiquent les informations relatives à leurs aménagements. Les bureaux d'ingénieurs HydroCosmos et Epicard contribuent aux aspects informatiques. Les développements scientifiques sont confiés à deux entités de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), le Laboratoire de Constructions Hydrauliques et le Laboratoire d'Écohydrologie (ancien Hydram), ainsi qu'à l'Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque de l'Université de Lausanne (UNIL).

## Références

- Bárdossy, A. (2000). Stochastic downscaling methods to assess the hydrological impacts of climate change on river basin hydrology. In Climate Scenarios for Water-Related and Coastal Impacts. Proceedings of the EU Concerted Action Initiative ECLAT-2 Workshop 3. KNMI, Netherlands, May 10–12th 2000, Climatic Research Unit, Norwich, pages 18–34.
- 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, EPFL Lausanne.
- Boillat, J.-L. (2005). L'influence des retenues valaisannes sur les crues Le projet MINERVE. Communication LCH N° 21, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3<sup>e</sup> Correction du Rhône – Nouveaux développements dans la gestion des crues, Martigny, 87–101.
- Bontron, G. (2004). Préviation quantitative des précipitations: Adaptation probabiliste par recherche d'analogues. Utilisation des Réanalyses NCEP/NCAR et application aux précipitations du Sud-Est de la France. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Deidda, R. (1999). Multifractal analysis and simulation of rainfall fields in space. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 24(1-2): 73–78.
- Eccel, E. et al. (2007). Prediction of minimum temperatures in an alpine region by linear and non-linear post-processing of meteorological models, Nonlinear Processes in Geophysics, 14: 211–222.
- Frei C. et Schär C. (1998). A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. International Journal of Climatology, 18(8): 873–900.
- García Hernández, J., Jordan, F., Dubois, J., Boillat, J.-L. et Schleiss, A. (2007). Routing System II: Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques. Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques N° 32, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.
- Glahn, H. R. et Lowry, D. A. (1972). The use of model output statistics (mos) in objective weather forecasting. Journal of Applied Meteorology, 11(8): 1203–1211.
- Haberlandt, U. (2007). Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. Journal of Hydrology, 332: 144–157.
- Hamdi, Y., Hingray, B. et Musy, A. (2005). Un modèle de prévision hydro-météorologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse. Wasser, Energie and Luft, Bern, 11-12: 325–332.
- Hewitson, B. et Crane, R. (1996). Climate downscaling: techniques and application. Climate Research, 7: 85–95.
- Hingray, B., Mezghani, A., Schaeffli, B., Niggli, M., Faivre, G., Guex, F., Hamdi, Y., Musy, A. (2006). Estimation des débits de crue du Rhône à la Porte du Scex et autres points amont caractéristiques. Rapport final du projet CONSECRU 2. Laboratoire Hydrologie et Aménagements. EPFL, Lausanne, 83p. + 86p. Annexes.
- 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, EPFL Lausanne.
- Joss, J. et al. (1997). Operational Use of Radar for Precipitation Measurements in Switzerland. Meteoswiss, Locarno, Switzerland.
- Marsigli, C., Montani, A. et Paccagnella, T. (2007). Ensemble activities at ARPA-SIM: the COSMO-LEPS and COSMO-SREPS systems. Proceedings, 29th International Conference on Alpine Meteorology, June 2007, Chambéry.
- Meile, T., Schleiss, A. et Boillat, J.-L. (2005). Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Wasser Energie Luft, Heft 5/6: 133–142.
- Obled, C., Bontron, G. et Garçon, R. (2002). Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. Atmospheric Research, 63(3-4): 303–324.
- Petrascheck, A., Hegg C. et al. OFEG, WSL (2002). Hochwasser 2000 – Les crues 2000 Analyse des événements, Rapports de l'OFEG, Série Eaux, Bern.
- Schäffli, B., Hingray, B., Niggli, M. et Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2: 73–117.
- Velasco-Forero, Carlos A. et al. (2009). A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. Advances in Water Resources, 32(7): 986–1002.
- Wetterhall, F. (2005). Statistical Downscaling of Precipitation from Large-scale Atmospheric Circulation: Comparison of Methods and Climate Regions. PhD thesis, Uppsala University.
- Xu, C.-y. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. Progress in Physical Geography, 23(2): 229–249.

## Adresses des auteurs

Javier García Hernández

Jean-Louis Boillat

EPFL-ENAC-IIC-LCH, Station 18

CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél. +41 21 693 23 85, Fax +41 21 693 23 66

javier.garciahernandez@epfl.ch

jean-louis.boillat@epfl.ch

Pascal Horton

UNIL-FGSE-IGAR, Amphipole 326

CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél. +41 21 692 35 42 Fax +41 21 692 35 35

pascal.horton@unil.ch

Cara Tobin

EPFL-ENAC-IIE-ECHO, Station 2

CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél. +41 21 693 37 19, Fax +41 21 693 37 39

cara.tobin@epfl.ch