HAL open science

Mieux prévoir les crues nivales : Evaluation de prévisions probabilistes de débit sur des bassins versants de montagne français

Pierre Nicolle, Maria-Helena Ramos, Vazken Andréassian, Audrey Valéry

To cite this version:

Pierre Nicolle, Maria-Helena Ramos, Vazken Andréassian, Audrey Valéry. Mieux prévoir les crues nivales : Evaluation de prévisions probabilistes de débit sur des bassins versants de montagne français. Colloque SHF : "L'eau en montagne, mieux observer pour mieux prévoir", Mar 2011, Lyon, France. p. 163 - p. 170. hal-00584138

HAL Id: hal-00584138

https://hal.science/hal-00584138v1

Submitted on 7 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MIEUX PREVOIR LES CRUES NIVALES : EVALUATION DE PREVISIONS PROBABILISTES DE DEBIT SUR DES BASSINS VERSANTS DE MONTAGNE FRANCAIS

Better predict snowmelt floods: evaluation of streamflow probabilistic forecasts over mountainous catchments in France

Pierre NICOLLE, Maria-Helena RAMOS, Vazken ANDREASSIAN

Cemagref, UR HBAN

BP44, 92163 Antony Cedex

e-mail: pierre.nicolle@cemagref.fr

Audrey VALERY

Coyne et Bellier

Le Delage - 5 rue du 19 mars 1962, 92622 Gennevilliers Cedex

e-mail: audrey.valery@gdfsuez.com

La prévision hydrologique présente des enjeux considérables concernant la sécurité des personnes et des biens, ainsi que la gestion des ressources en eau. Bien prévoir les débits est essentiel pour prendre les bonnes décisions. Certains types de bassins versants présentent cependant des défis particuliers : c'est notamment le cas des espaces montagneux, où l'importante présence de neige et les difficultés de mise en place de réseaux de mesures compliquent la simulation des débits. Cette étude vise à évaluer l'amélioration apportée par l'intégration d'un module neige au sein d'un modèle de prévision hydrologique. Le module Cemaneige et le modèle de prévision hydrologique GR3P ont été utilisés, les deux étant des outils développés au Cemagref. Une analyse comparative des modèles de prévision GR3P (sans module neige) et GR5P (GR3P avec module neige) a été réalisée au pas de temps journalier et sur un échantillon de 176 bassins versants français situés dans des massifs montagneux. Les modèles hydrologiques utilisent en entrée quatre années de prévisions de précipitation du système de prévision d'ensemble PEARP de Météo-France (2005 à 2009). Onze scénarios équiprobables de débits sont prévus à chaque jour et pour deux échéances de prévision (j+1 et j+2). Les débits prévus sont évalués par rapport aux débits observés de la banque HYDRO. Les résultats montrent que le modèle GR5P est globalement plus performant que sa version sans traitement du stockage et de la fonte de la neige. GR5P démontre toute son utilité lorsque l'échéance de prévision augmente. La différenciation des bassins versants en régimes hydrologiques a montré que l'apport du module neige est considérable pour les régimes de type nival. Cependant, ces bassins obtiennent encore des critères de performance inférieurs aux bassins versants les moins influencés par la neige : le module neige, bien qu'appréciable, ne permet pas à lui seul de combler le fossé entre la modélisation de ces différents types de bassin.

***Mots-clés :** modélisation hydrologique, module neige, prévision d'ensemble*

Hydrological forecasting presents considerable challenges concerning the protection of people and properties, as well as the management of water resources. Good streamflow estimates are essential to make the right decisions. However, certain catchments present particular challenges: this is the case of mountainous areas, where the occurrence of snow and the difficulties of implementing observational networks complicate the modelling of flows. This study aims at evaluating the improvements from the integration of a snow module to a hydrological forecasting model. The Cemaneige snow routine and the GR3P hydrological model, both tools developed at Cemagref, were used. A comparative analysis of the two models GR3P (without snow modelling) and GR5P (GR3P with snow modelling) was performed at daily time steps and on a sample of 176 French catchments located in mountainous areas. The hydrological models are driven by four years of PEARP precipitation ensemble forecasts from Météo-France (2005-2009). Eleven equally probable scenarios of streamflow are predicted daily and to two forecasting lead times (d+1 and d+2). Forecast discharges are evaluated against observed discharges from the Banque HYDRO database. The results show that the model GR5P is globally more efficient than the model version without treatment of snow storage and melting. The improvement becomes more significant when the forecasting lead time increases. The classification of catchments according to their hydrological regimes showed that the contribution of the snow routine is significant for nival regimes. However, the performances on snow-affected catchments remain significantly lower than the performances on catchments less influenced by the snow: the snow routine, although important, does not allow in itself to fill the gaps between the modelling of these different types of catchments.

***Keywords**: hydrological modelling, snow routine, ensemble forecasting*

I INTRODUCTION

Lorsque la neige tombe au sol, les précipitations neigeuses sont susceptibles de s'accumuler pendant une période plus ou moins longue, pour former un véritable réservoir d'eau sous forme solide (manteau neigeux). Nous nous intéressons ici aux besoins et aux manières de prendre en compte la neige dans la modélisation hydrologique et ainsi gérer son stockage et fonte. D'un point de vue temporel, l'évolution de la neige (formation et comportement au sol) peut être reliée aux températures. En fait, la neige suit la même saisonnalité que ces dernières. Lors des périodes de basses températures, l'eau peut s'accumuler au sol sous forme de neige. Lorsque les températures augmentent (au printemps), la fonte libère l'eau stockée. Ce phénomène est également observable à des échelles de temps plus fines (journalière ou horaire). Il occasionne un décalage, parfois important, entre le moment où l'eau tombe sur le bassin et le moment où elle est remobilisée à travers les processus de fonte ([1]). C'est ce décalage qui peut poser d'importants problèmes de modélisation. A titre d'illustration, la **figure 1** présente une simulation hydrologique du modèle GR4J sur la Durance à Serre-Ponçon (Hautes-Alpes) ([2]). Pour ce modèle, qui ne possède pas un module spécifique de traitement de la neige, la neige est considérée comme une précipitation liquide et participe directement à l'écoulement. Ceci occasionne une surestimation des débits modélisés durant la période où la neige tombe au sol (fin octobre à fin mars). En revanche, lors de la fonte, cette précipitation, que le modèle a déjà "utilisée", ne participera pas au débit modélisé : les crues réelles dues à cette fonte sont alors sous-estimées (fin avril à juin). Pour palier à cela, des outils appelés communément "modules neige" sont développés et incorporés à la modélisation pluie-débit. De manière générale, ces outils permettent de représenter l'accumulation des précipitations neigeuses sur le bassin, l'évolution de la couverture neigeuse et la remobilisation lors de la fonte. Ils sont utilisés conjointement au modèle hydrologique pour fournir une modélisation complète du bassin.

L'apport d'un module neige au modèle hydrologique GR4J a été étudié au Cemagref et un module neige, baptisé Cemaneige, a été proposé pour la structure des modèles à réservoir GR ([2]). L'étude ici présentée synthétise l'analyse conduite dans [3]. Le but est d'évaluer l'amélioration apportée par l'intégration du module Cemaneige au sein du modèle de prévision hydrologique GR3P, un outil également développé au Cemagref. Une analyse comparative des modèles sans et avec module neige est présentée au pas de temps journalier et sur un échantillon de 176 bassins versants français situés dans des massifs montagneux.

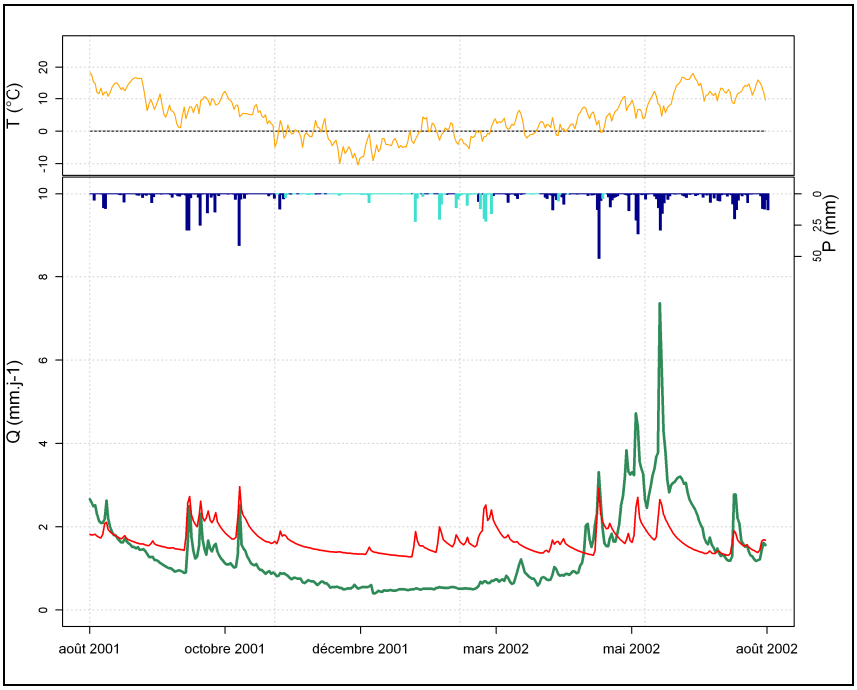

Figure 1 : Débits observés (en vert) et simulés (en rouge) avec le modèle GR4J (sans module neige) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon (3580 km²) pour la période d'août 2001 à août 2002 (tiré de [2]). Les précipitations (pluie en bleue et neige en cyan) et températures (graphique du haut, en orange) observées sont également indiquées.

II DONNEES ET METHODE

II.1 Données

II.1.1 Données observées

Les précipitations et les températures proviennent de la base de données issue du système d'analyse météorologique SAFRAN de Météo-France ([4], [5]). L'évapotranspiration, utilisée en entrée du modèle hydrologique, est celle calculée à partir de la formule d'Oudin ([6]). Les débits journaliers sont issus de la banque de données HYDRO[1].

II.1.2 Données prévues

Les prévisions de précipitations (pluie et neige) et de températures de la PEARP (Prévision d'Ensemble ARPège) de Météo-France ([7]) sont utilisées. Les valeurs des mailles de la PEARP (64 km2) sont agrégées sur nos bassins (moyenne pondérée par les superficies des mailles appartenant au bassin). Les prévisions, lancées à 18h le jour j d'émission de la prévision et disponibles au pas de temps tri-horaire, sont agrégées pour fournir des jours entiers (0 à 24 h) pour l'échéance journalière 1 (j+1) et l'échéance 2 (j+2). Les 11 scénarios de la PEARP sont utilisés en entrée du modèle hydrologique et les 11 prévisions hydrologiques d'ensemble résultantes sont évaluées.

II.1.3 Bassins versants d'étude

Les 176 bassins versants utilisés sont tous des bassins de montagne français, localisés sur les reliefs du Massif Central, du Jura, des Alpes et des Pyrénées (**figure 2**). Ils présentent les avantages suivants :

- des bassins peu à fortement influencés par la neige ;
- une limitation de phénomènes qui pourraient "bruiter" le signal de débit lié à la neige : pourcentage de surface glaciaire nul ou limité, superficie des surfaces en eau (lacs) limitée, caractère "naturel" des bassins, c'est-à-dire sans dérivation ou exploitation anthropique significative, privilégié ;
- une certaine hétérogénéité de l'échantillon en termes de caractéristiques physiographiques, climatiques et hydrologiques, comme le montre le **tableau 1**.

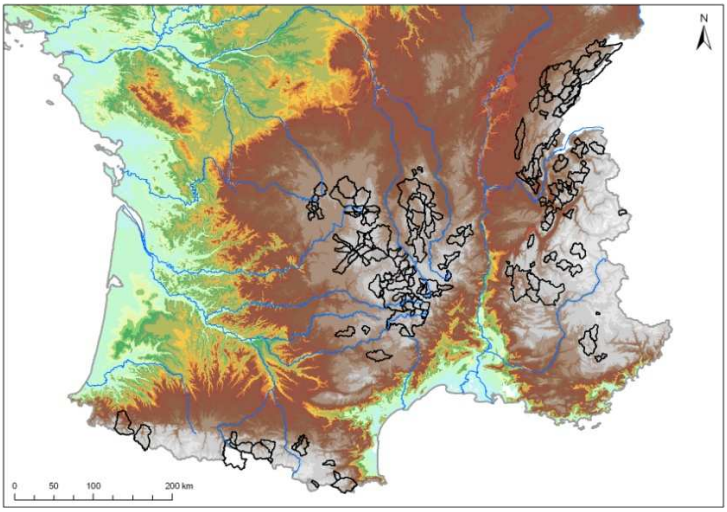

Figure 2 : Carte de localisation des 176 bassins versants étudiés

Tableau 1 : Principales caractéristiques des bassins versants étudiés (entre crochets, valeurs minimales et maximales et, en bas, valeur médiane sur 176 bassins)

Superficie (km²)	Zmed (m)	ΔZ (m)	P (mm/an)	Q (mm/an)	ETP (mm/an)	Neige (mm/an)	% Neige
[5 ; 2210] 105	[386 ; 2681] 1035	[133 ; 2644] 833	[763 ; 2287] 1357	[233 ; 2070] 671	[280 ; 714] 588	[12 ; 740] 87	[1 ; 51] 7

Afin de caractériser davantage notre échantillon de bassins versants, nous avons choisi de les différencier en fonction de leurs régimes hydrologiques. L'objectif est de pouvoir évaluer l'apport du modèle de prévision

[1] http://www.hydro.eaufrance.fr/

avec prise en compte de la neige que nous développons selon ces différents régimes : dans quel cas l'introduction du module Cemaneige dans le modèle GRP apporte-t-il plus/moins de performance? Compte tenu de l'importance de notre échantillon et de la complexité de caractériser les facteurs à l'origine des régimes hydrologiques, nous avons cherché à nous baser sur une classification objective. Nous avons ainsi classé notre échantillon sur la distance à chaque régime de référence établi par la classification proposée dans [8]. Le manque de représentativité de certains régimes hydrologiques dans notre échantillon nous a amené à effectuer un regroupement en 3 types de régimes : dominante pluviale, régime de transition, dominante nivale. La **figure 3** représente la carte des régimes des 176 bassins versants.

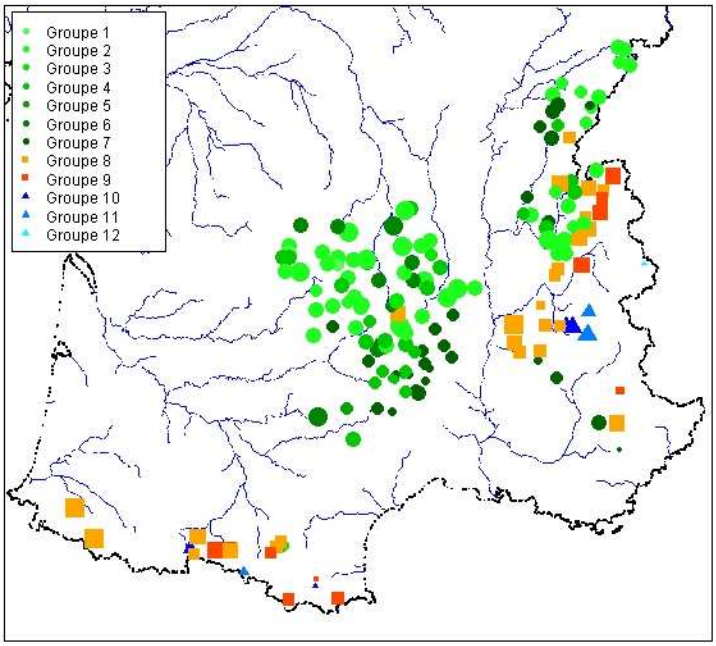

Figure 3 : Les régimes hydrologiques de 176 bassins versants à partir de la classification de Sauquet (groupes 1 à 12 ; [8]) et du regroupement fait dans cette étude (cercle : dominante pluviale, carré : transition et triangle : dominante nivale). La taille des symboles indique la distance à chaque régime : plus la distance est faible, plus le point est gros.

II.2 Modèles utilisés

II.2.1 Le modèle de prévision hydrologique : GR3P

Dans cette étude, nous utilisons le modèle de prévision hydrologique GR3P au pas de temps journalier, initialement proposé par [9] et adapté pour la prévision d'ensemble [10]. C'est un modèle global à 3 paramètres, qui possède une structure à réservoir et fonctionne en continu. Dans le modèle GR3P, la pluie est neutralisée par l'évapotranspiration potentielle avant d'être intégrée à un réservoir de production. Ce réservoir gère la part des précipitations qui va participer à l'écoulement (pluie nette) et permet ainsi d'assurer un suivi indirect (via l'état de ce réservoir) des conditions d'humidité du bassin. Cette pluie nette est ajustée pour permettre notamment de tenir compte d'éventuels échanges avec des nappes profondes et/ou des bassins voisins. Le transfert de l'eau est ensuite assuré par un hydrogramme unitaire qui permet de prendre en compte le décalage temporel entre la pluie et le débit. Cet hydrogramme est associé à un réservoir de routage quadratique pour fournir le débit de sortie à l'exutoire du bassin. Ce réservoir permet de mettre à jour le modèle en assimilant le dernier débit observé. Le niveau du réservoir est ainsi recalculé pour générer un débit égal au dernier débit observé à l'instant de prévision.

II.2.2 Le module de prise en compte de la neige : Cemaneige

CemaNeige est un modèle de prise en compte de la neige à 2 paramètres, développé par [2]. C'est un modèle qui prend en compte une discrétisation spatiale du bassin versant par l'altitude, compte tenu que cette dernière est un facteur prépondérant en ce qui concerne la neige, du fait de son impact sur les températures. Dans le module Cemaneige, les températures et précipitations de bassins sont extrapolées pour chaque bande d'altitude prédéfinie. Le module détermine la part des précipitations liquides et solides à partir de la température. Les précipitations solides sont intégrées à un réservoir qui représente le manteau neigeux. Une fonction de transfert permet de calculer la lame de fonte écoulée issu du réservoir de stockage. Cette lame de fonte est ajoutée aux précipitations liquides en entrée du modèle hydrologique.

II.3 Méthode d'évaluation

Nous optons pour une approche comparative entre les résultats du modèle de prévision GR3P et ceux de sa version à 5 paramètres, GR5P, qui intègre le module neige. L'évaluation a été menée en deux étapes. Dans un premier temps, les performances du modèle sont évaluées en prenant comme scénario de pluie future les pluies observées *a posteriori* (scénario pluies futures "parfaites"). Cette « évaluation en contrôle » est faite sur la période d'août 2000 à mars 2005, période indépendante de la période de calage du modèle, et nous présentons ici les résultats basés sur le critère de persistance (C2MP), qui compare le modèle de prévision à un modèle naïf qui prévoit toujours le dernier débit observé. Dans un deuxième temps, le modèle est alimenté par les scénarios de prévision météorologique d'ensemble du système PEARP. Ainsi, pour chaque jour de prévision, on dispose d'un ensemble de 11 scénarios de débits prévus à deux échéances journalières (j+1 et j+2). L'évaluation est faite sur une période de quatre années (mars 2005 à juillet 2009) et à l'aide de critères statistiques de performance des prévisions probabilistes. Ici, nous présentons les résultats obtenus avec le critère de probabilité ordonnée (RPS). Pour plus de détails, on se reportera à [3].

III RESULTATS

III.1 Evaluation en contrôle

Les résultats en condition de pluies futures "parfaites" montrent une nette amélioration du critère de performance avec GR5P (**figure 4**) : 64% des bassins (113 bassins) améliorent significativement leur critère et seulement 13% des bassins (23 bassins) le dégradent (le restant de l'échantillon ne présentant pas une variation significative de la valeur du critère de performance). L'amélioration est observée pour tous les bassins à dominante nivale, tandis qu'elle touche 63% des bassins à dominante pluviale et 92% des bassins caractérisés par un régime hydrologique de transition.

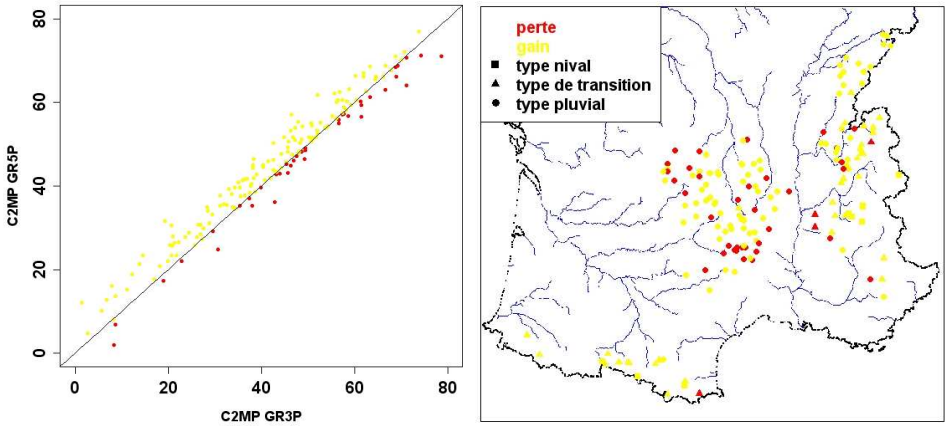

Figure 4 : Corrélogramme des performances de GR5P (modèle avec prise en compte de la neige) en fonction de GR3P (sans prise en compte de la neige) (à gauche) et carte des améliorations et dégradation des performances en fonction des régimes hydrologiques (à droite). Evaluation sur 176 bassins versants et sur la période du 01/08/2000 au 10/03/2005. Les pluies observées sont considérées en prévision (scénario de pluies futures "parfaites").

III.2 Evaluation de la qualité des prévisions

L'évaluation de la prévision hydrologique d'ensemble montre également une amélioration des performances (**figure 5**), et ceci pour près de 75% des bassins de type nival et de transition pour l'échéance j+1, et pour plus de 90% des bassins de type nival pour l'échéance j+2. Les bassins appartenant aux régimes de transition et nival sont ceux qui fournissent les plus importantes améliorations de performance, ce qui indique que le module remplit bien sa fonction.

La **figure 5** montre le gain en performance évalué sur la base du score de probabilité ordonnée RPS. Nous avons cependant utilisé d'autres scores spécifiques à la prévision des crues qui s'appuient sur le dépassement de seuils de débits prédéfinis (résultats présentés dans [3]), et un gain plus important de performances pour le modèle GR5P a également été observé quand on s'intéresse aux plus forts débits.

Enfin, l'analyse d'événements particuliers a également montré l'apport du module neige dans le modèle de prévision : dans le cas ici illustré à la **figure 6** (bassin de la Dore à Dorat, 1523 km²), le pic de crue dû à la fonte qui se déclenche aux alentours du 13-14 mars n'a pu être simulé que par le modèle GR5P, avec prise en compte du stockage et de la fonte de le neige.

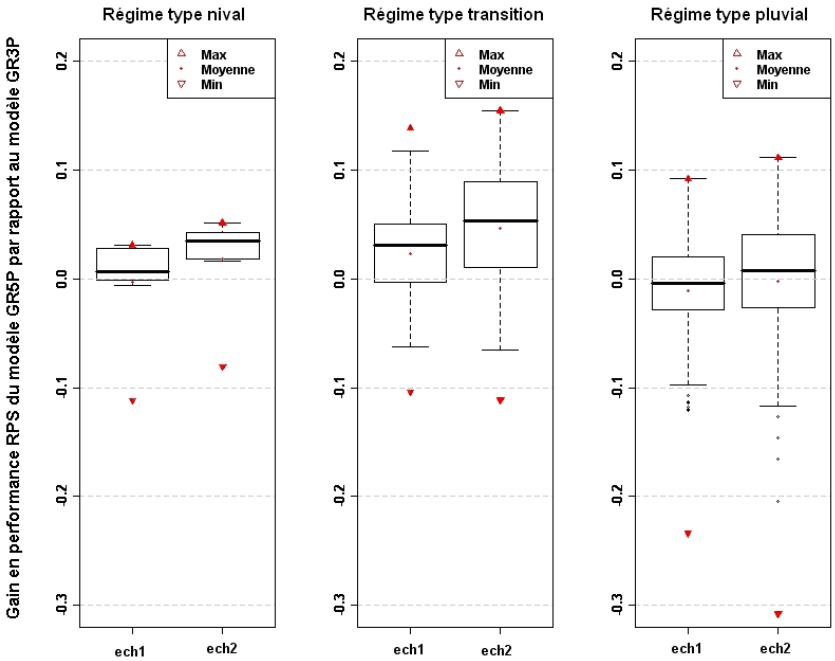

Figure 5 : Gain en performance du score probabiliste RPS du modèle GR5P (avec module neige) par rapport au modèle GR3P (sans module neige) pour deux échéances journalières de prévision (j+1 et j+2) et en fonction des régimes hydrologiques des bassins étudiés. Statistiques sur 176 basins versants et les prévisions du 10/03/2005 au 31/07/2009. Boites à moustaches : le trait à l'intérieur représente la médiane des valeurs, les limites inférieures et supérieures des boîtes, les quantiles 25% et 75%, et les limites inférieures et supérieures des moustaches, les quantiles 10% et 90%. Les prévisions d'ensemble PEARP de Météo-France sont considérées en entrée du modèle hydrologique.

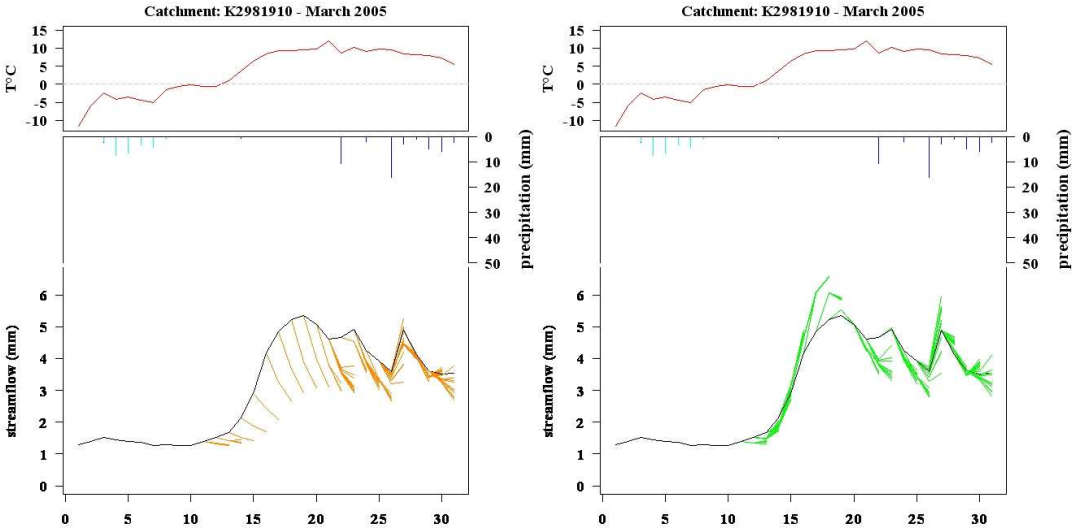

Figure 6 : Hydrogrammes de débits observés (en noir) et prévus (11 scénarios de la prévision d'ensemble) par les modèles GR3P sans module neige (à gauche, en orange) et GR5P avec prise en compte de la neige (à droite, en vert) sur le bassin de la Dore à Dorat (1523 km2) au mois de mars 2005. Les précipitations (pluie en bleue et neige en cyan) et températures (graphique du haut, en rouge) observées sont également indiquées.

IV CONCLUSIONS

Ce travail a permis d'évaluer l'apport du module neige Cemaneige pour la prévision hydrologique d'ensemble au pas de temps journalier. La caractérisation des bassins versants en différents régimes hydrologiques nous a permis d'observer plus précisément quel pouvait être cet apport dans des conditions où la neige avait plus ou moins d'influence sur les débits.

D'une part, la comparaison des résultats des deux modèles, avec et sans prise en compte du stockage et de la fonte de la neige, nous a permis d'avoir un aperçu des performances en prévision déterministe (cas des prévisions de pluie « parfaites », où la prévision météorologique est remplacée par les observations) par l'analyse et évaluation en contrôle. Les résultats ont montré que le modèle avec prise en compte de la neige présentait de meilleurs résultats que son équivalent sans module neige. Les résultats deviennent même encore meilleurs avec l'augmentation de l'influence de la neige sur les débits, et également avec l'échéance de prévision.

D'autre part, nous avons pu évaluer l'apport de la prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique en condition de prévisions probabilistes d'ensemble. Pour cela, nous avons utilisés les 11 scénarios de la prévision météorologique PEARP de Météo-France. Globalement, les conclusions sont les mêmes que pour l'évaluation en scénario déterministe : les performances associées au modèle avec module neige sont très majoritairement meilleures que celles du modèle sans prise en compte de la neige. De plus, dans le cadre de la prévision des crues, les scores qui utilisent des seuils de débits ont montré un gain plus important de performance quand on s'intéresse notamment aux plus forts débits. On soulignera ici que la synthèse et l'interprétation des résultats constituent une étape délicate dans la prévision d'ensemble. En effet, nombreux sont les critères qui permettent d'évaluer les performances d'un système de prévision d'ensemble et les valeurs moyennes utilisées dans les critères de type déterministe ne permettent pas de refléter la variabilité des résultats et la richesse d'information donnée par les différents scénarios de la prévision d'ensemble. Les performances des modèles sont ainsi assez complexes à analyser, du fait de la complexité même des critères et du caractère probabiliste des prévisions.

En conclusion, même si le modèle avec prise en compte de la neige présente encore de moins bonnes performances pour les bassins du type nival, par rapport aux bassins versants peu influencés par la neige, l'introduction d'un module neige au sein du modèle hydrologique GR3P apporte des améliorations conséquentes pour la prévision hydrologique. Même quand les paramètres libres du module neige sont fixés à des valeurs moyennes obtenues sur la France ([2]), les performances restent très satisfaisantes et même meilleures que celles de la modélisation sans module neige ([3]). Ceci ouvre des perspectives intéressantes pour des études et applications opérationnelles sur des bassins versants non jaugés, où le calage des paramètres est une tâche délicate, voire parfois impossible.

V REFERENCES ET CITATIONS

[1] Hingray, B., Picouet, C., Musy, A. (2009), *Hydrologie, une science pour l'ingénieur*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 650 p.

[2] Valéry, A. (2010), *Modélisation précipitations-débit sous influence nivale, élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants.* Thèse de doctorat, ENGREF, Cemagref, Paris, 405 p.

[3] Nicolle, P. (2010), *Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales*, mémoire de Master, Université Pierre et Marie Curie, Cemagref, Paris, 53 p.

[4] Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L. et Morel, S. (2008), Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47 (1) : 92-107.

[5] Vidal, J.-P., Martin, É., Franchistéguy, L., Baillon, M. et Soubeyroux, J.-M. (2009). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30 : 1627-1644.

[6] Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C. (2005), Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303 (1-4) : 290-306.

[7] Nicolau J. 2002. Short-range ensemble forecasting. In Proceedings *WMO/CBS Technical Conferences On Data Processing and Forecasting Systems*, Cairns, Australia, 2-3 Dec, 4p.

[8] Sauquet, E. (2006), *Cartographie des écoulements moyens mensuels en France*. Note de synthèse Cemagref, 92 p.

[9] Tangara, M. (2005), *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, EPHE, Cemagref, Paris, 374 p.

[10] Ramos, M.H., Thielen, J., Pappenberger, F. (2008), Utilisation de la prévision météorologique d'ensemble pour la prévision opérationnelle et l'alerte aux crues. *Colloque SHF Prévisions hydrométéorologiques*, Lyon, 18-19/11/2008, 191-199.