

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique :
quel apport pour mieux prévoir les crues nivales ?**

Pierre NICOLLE

Encadrante : Maria Helena RAMOS



CEMAGREF
Parc de Tourvoie,
92163 Antony

Septembre 2010



Abstract

Hydrological forecasting presents considerable challenges: protection of people and properties, power production, etc. 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. The introduction of a snow model in a hydrological forecasting model should help make improvements on the simulation of flows of snow-affected catchments, while not degrading the prediction on the other basins. This study aims at evaluating the improvements from the integration of the snow module Cemaneige to the hydrological forecasting model GR3P, both tools developed at Cemagref.

A comparative analysis of the two models GR3P (without snow modelling) and GR5P (GR3P + snow modelling) at a daily time step was performed on a sample of 176 French catchments located in mountainous areas. The hydrological flow forecasts use as input four years of PEARP meteorological ensemble forecasts from Météo-France (2005-2009). Thus, 11 equally probable scenarios of streamflow are predicted to two forecasting lead times (d+1 and d+2). The study consisted of the introduction of the snow modelling routine within the structure of the GR3P model, and in the evaluation of this new model in ensemble prediction.

Following this work, it appeared that the model GR5P was more efficient than the version without treatment of snow. The improvement becomes more significant when the forecasting lead time increases. In fact, the streamflow-based model update (i.e. the assimilation of the last observed flow into the hydrological model) tends to minimize the differences between the two models (GR3P and GR5P) at the first lead time. 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 these different types of catchments. The results open new prospects for the adaptation of the modelling framework at the hourly time step.

Keywords: hydrological modelling, snow routine, ensemble forecasting

Remerciements

Pour avoir eu la chance d'effectuer un stage extrêmement enrichissant, et sur un sujet particulièrement intéressant, je tiens à remercier...

Le Cemagref, pour m'avoir fait confiance et permis d'effectuer ce stage.

Maria-Helena Ramos, mon encadrante, pour sa disponibilité, sa méthodologie et sa rigueur. Ces mots ne suffisent pas pour décrire l'aide qu'elle m'a apporté et lui adresser ma plus profonde reconnaissance.

L'équipe hydrologie pour m'avoir fait part de leurs connaissances et de leur expérience, mais aussi pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse. Le week-end de découverte du point-triple Rhône-Loire-Garonne restera un moment que je retiendrai tout particulièrement.

Vazken Andreassian et Charles Perrin pour leurs conseils et leur aide, notamment en matière de programmation.

L'ASCCR pour les parties de frisbee enflammées disputées.

Merci également pour l'ambiance plus qu'agréable qui règne au Cemagref au sein de l'équipe. Ce stage m'a apporté bien plus que des compétences scientifiques.

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction	6
Première partie : Synthèse bibliographique.....	7
<i>I.1 Genèse et évolution physique de la neige au sol : rappel</i>	7
I.1.1 Formation de la neige	7
I.1.2 Comportement de la neige au sol	8
<i>I.2 Des difficultés pour la modélisation hydrologique</i>	8
<i>I.3 La prévision d'ensemble</i>	10
Deuxième partie : Données, outils et méthodes	12
<i>II.1 Les données utilisées</i>	12
II.1.1 Les données observées	12
II.1.2 Les prévisions d'ensemble	13
II.1.3 Les bassins versants de l'étude.....	14
<i>II.2 Caractérisation des régimes hydrologiques des bassins versants</i>	15
II.2.1 Rappels sur les régimes hydrologiques	15
II.2.2 La classification de Sauquet (2006)	16
II.2.3 Les régimes hydrologiques des bassins versants de cette étude.....	18
<i>II.3 Vers un modèle de prévision avec prise en compte de la neige : GR5P</i>	20
II.3.1 Le modèle de prévision : GR3P	20
II.3.2 Le module de prise en compte de la neige : Cemaneige	21
<i>II.4 Mise en place du modèle et méthode d'évaluation</i>	26
II.4.1 Procédure générale	26
II.4.2 Les critères d'évaluation en calage/contrôle.....	26
II.4.2 Les critères d'évaluation pour la prévision	27
Troisième partie : Résultats et interprétation	30
<i>III.1 Configuration et paramétrisation de GR5P : analyses de sensibilité</i>	30
III.1.1 Le paramètre B : la capacité du réservoir de production.....	30
III.1.2 Impacts de l'initialisation des paramètres libres de Cemaneige	31
III.1.3 Utilisation d'un gradient altitudinal fixe ou variable.....	31
III.1.4 Sensibilité des performances et des paramètres à l'échéance de prévision.....	32
III.1.5 Paramètres libres ou fixes pour Cemaneige?.....	33
III.1.6 Configuration finale du modèle GR5P	34
<i>III.2 Evaluation de l'apport du module neige</i>	34
III.2.1 Performances en contrôle	35
III.2.2 Evaluation de la qualité des prévisions.....	38
Conclusion et perspectives	48
Références bibliographiques	49
Liste des figures et tableaux	51

Avant-propos

Ce rapport est l'aboutissement d'un travail de 7 mois réalisé au Cemagref dans le cadre du Master 2 Hydrologie, Hydrogéologie de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Ce stage s'est déroulé au sein de l'unité Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN), dans l'équipe HYDRO (Hydrologie des Bassins Versants) autour du thème de recherche ARCEAU (aléas et risques liés au cycle de l'eau), qui regroupe différents chercheurs de plusieurs centres du Cemagref¹. Le stage s'inscrit pleinement dans ce thème de recherche, puisqu'il s'agissait de travailler sur la prévision hydrologique.

Le Cemagref est un institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement ; établissement public à caractère scientifique et technologique créé en 1981. Il a pour mission de répondre à des questions concrètes de société dans le domaine de la gestion durable des eaux et des territoires, en produisant de nouvelles connaissances et techniques utiles aux gestionnaires, décideurs et entreprises. Les recherches sont axées sur les ressources en eau de surface, les écosystèmes aquatiques et terrestres, les espaces à dominante rurale, les technologies pour l'eau, les agrosystèmes et la sûreté des aliments, le tout dans une perspective de gestion durable des eaux et territoires. Le Cemagref compte 9 centres en France métropolitaine et 1 en Martinique. Le centre d'Antony compte 3 unités de recherche. Les travaux de l'unité HBAN (Hydrosystèmes et Bioprocédés) portent sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants (relations pluies/débits), ainsi que sur l'impact des aménagements et pratiques agricoles. L'équipe HYDRO effectue des travaux de recherche axés sur la modélisation pluie/débit et ses applications. On citera notamment le développement d'une famille de modèles conceptuels, les modèles GR (pour Génie Rural). Parmi ceux-ci, un modèle de prévision hydrologique a été développé en 2005 par Tangara (Tangara, 2005), d'après le modèle GR4J (Perrin, 2000, Perrin *et al.*, 2001, 2003) et équipe aujourd'hui plusieurs services de prévision des crues (SPC) en France. Il a été récemment adapté pour utiliser en entrée plusieurs scénarios de précipitations prévues (Ramos *et al.*, 2008). Le stage vise à contribuer à l'amélioration de ce modèle de prévision hydrologique.

Les organismes de prévision opérationnelle en France :

Le SCHAPI, Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, a été créé en 2003 à Toulouse et réunit des experts en météorologie et hydrologie. Ses principales missions consistent en l'appui des services de prévision des crues au niveau national, ainsi qu'en une surveillance hydrométéorologique 24h/24h sur les bassins rapides et des tronçons de vigilance réglementés. Le décret n°2005-28 du 12 janvier 2005² précise, entre autres, que le schéma directeur de prévision des crues "identifie les cours d'eau ou sections de cours d'eau pour lesquels l'Etat assure la transmission de l'information sur les crues et leur prévision, ainsi que ceux pour lesquels il prévoit de le faire, eu égard à leur fonctionnement hydrologique, au nombre des communes susceptibles d'être inondées et à la gravité des dommages que les inondations peuvent provoquer, lorsqu'une telle prévision est techniquement possible à un coût proportionné à l'importance des enjeux". Depuis juillet 2006, le SCHAPI met alors à disposition une carte de vigilance des crues (<http://www.vigicrues.gouv.fr/>), accompagnée de bulletins d'information en temps réel sur la chronologie et l'évolution des crues (Circulaire du 06/12/07 relative à la production opérationnelle de la vigilance crues² ; BO du MEDAD n° 3 du 15 février 2008). Chaque cours d'eau représenté est affecté d'un code couleur selon le niveau de vigilance nécessaire pour faire face à de possibles inondations futures dans les 24 heures. Les SPC (Services de Prévision des Crues) sont les premiers interlocuteurs des collectivités dans la prévision des crues pour mieux anticiper ces phénomènes. Ils conseillent et veillent à la cohérence des outils et méthodes utilisés. Il existe 22 SPC, chacun rattaché à un territoire d'intervention sur une logique de bassin versant. Ils recueillent et traitent les informations sur les cours d'eau surveillés, pour diffuser, conjointement avec le SCHAPI, des messages d'informations individualisés par tronçon de cours d'eau (incluant les prévisions d'évolution de la situation).

¹ <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/le-centre-dantony/ur-hban/hydro>

² <http://www.ineris.fr/aida/>

Introduction

Les processus d'écoulement des cours d'eau sont de mieux en mieux connus et compris, de l'apport des précipitations au transfert et à l'écoulement dans les rivières. Néanmoins, réussir à reproduire le débit d'un cours d'eau, malgré l'état de connaissance de ces processus, reste une tâche relativement ardue. En effet, l'abondance, la complexité et l'interdépendance des mécanismes à l'œuvre ainsi que les impacts anthropiques sur ceux-ci imposent des limites à la modélisation précipitation-débit, tout comme les limites imposées par les techniques d'acquisition de données diverses nécessaires à la modélisation (caractéristiques des bassins versants, mesures ou détermination des données d'entrée). Ainsi, prévoir le comportement d'une rivière s'avère encore plus compliqué. Pourtant, la prévision hydrologique revêt des enjeux particulièrement importants, aussi bien dans la gestion de l'eau (production hydroélectrique des barrages, protection des écosystèmes fluviaux, etc.) que dans le domaine des risques (inondations et sécheresses). Nous pouvons citer à titre d'exemple les récentes inondations du 17-18 juillet 2010 dans le Var (Draguignan) avec des cumuls de précipitations dépassant localement 380 mm pour un bilan humain s'élevant à 25 morts, sans parler des dégâts matériels que ces catastrophes occasionnent. Ainsi, bien prévoir les débits est essentiel pour les décisionnaires.

Malheureusement, la modélisation n'est pas parfaite (si tant est qu'elle le sera un jour) et nécessite encore d'être améliorée, et plus particulièrement pour certaines conditions. C'est le cas des milieux où la présence de neige a une influence sur les débits, et notamment en montagne. La neige doit être prise en compte de façon particulière, de par la spécificité de son impact sur l'hydrologie du bassin versant. En effet, la réponse hydrologique du bassin à la neige est différente de celle de la pluie, du fait du stockage et de la fonte de cette neige, variables dans le temps et dans l'espace. Ainsi, les hydrologues développent des outils qui permettent de tenir compte de cette spécificité au sein de la modélisation hydrologique. Récemment, un de ces outils, baptisé Cemaneige, a été développé au Cemagref et a été testé sur le modèle de simulation GR4J (Valéry, 2010). Les résultats associés ont été prometteurs : une nette amélioration du critère de performance a été observée lors de la prise en compte du stockage et de la fonte de la neige dans la modélisation hydrologique en simulation. Mais qu'en est-il pour la prévision? Quel apport peut-on espérer de la prise en compte de la neige pour la prévision de débits, et notamment pour la prévision d'ensemble, où différents scénarios futurs de précipitations et températures sont mis à disposition par les modèles météorologiques de prévision du temps?

Cette étude se propose de répondre à cette question, en intégrant l'outil Cemaneige, développé par Valéry (2010), au modèle de prévision GR3P et en évaluant la qualité des prévisions fournies par la modélisation intégrée. Nous commencerons par présenter, dans une première partie, une synthèse bibliographique sur la neige et la modélisation hydrologique. Nous tenterons de comprendre pourquoi il neige et comment cette neige se comporte lorsqu'elle est précipitée, avant de présenter les principales difficultés liées à la modélisation des précipitations neigeuses au sein du bassin versant. Nous finissons cette partie en présentant succinctement les principales notions liées à la prévision hydrologique d'ensemble. Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous détaillerons les données, outils et méthodes utilisés pour répondre à nos objectifs. Enfin, la dernière partie sera consacrée à la présentation de nos résultats, avant de conclure.

Première partie : Synthèse bibliographique

Dans cette partie, nous nous inspirons très fortement des travaux de Valéry (2010), qui présentent un condensé de la littérature disponible sur la neige et la modélisation hydrologique. Nous présentons également quelques rappels sur la prévision hydrologique d'ensemble.

1.1 Genèse et évolution physique de la neige au sol : rappel

1.1.1 Formation de la neige

Nous occultons volontairement toute la partie amont de la genèse des précipitations jusqu'à la formation des nuages. Ce qui nous intéresse ici concerne le moment où la vapeur d'eau contenue dans ces nuages est précipitée et sous quelle forme. Un nuage est composé d'air humide (contenant de la vapeur d'eau), de minuscules particules d'eau liquide (gouttelettes) et/ou solide (cristaux de glace) en suspension. Le pourcentage de chaque phase dépend de la température. D'après Météo-France, 97% des précipitations sous nos latitudes prennent naissance dans des nuages à température négative, mais cela ne signifie pas que le nuage est composé uniquement d'eau sous forme solide ! Il peut contenir des gouttelettes d'eau surfondue à des températures très négatives (jusqu'à -40°C). A une température entre -10°C et 0°C , la proportion d'eau liquide sera non-négligeable et pourra conduire à la formation de pluie et non de cristaux de glace au sein du nuage. Dubé (2003), cité dans Valéry (2010), donne des ordres de grandeur des proportions d'eau liquide/solide en fonction de la température : *"On estime qu'à -10°C , 60% des nuages contiennent de la glace. A -15°C , la proportion augmente à 90%, et à -20°C elle passe à 100%."*

Pour qu'il y ait précipitation, un accroissement de la taille des particules est nécessaire, jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment lourdes pour amorcer leur chute. Dans le cas où le nuage contient des cristaux de glaces, et où ceux-ci sont précipités, il est possible qu'ils n'atteignent pas le sol sous cette forme. En effet, la nature des précipitations atteignant le sol est étroitement liée à la température de l'atmosphère sous le nuage duquel tombent les cristaux de glace. Plusieurs situations sont possibles dans la réalité et, en synthèse, les plus communes sont :

- si la température est négative de la base du nuage jusqu'au sol, les précipitations tombent sous forme de neige ;
- si la température devient positive au fur et à mesure qu'on s'approche du sol, les précipitations atteignant le sol sont liquides.

L'atmosphère peut néanmoins présenter un profil de température plus complexe : négative directement sous le nuage, puis positive lorsque les précipitations s'approchent du sol, les précipitations deviennent alors liquides. De plus, si la température redevient ensuite négative à l'approche du sol, celle-ci peut modifier encore la nature des précipitations. La nature de celles-ci dépend alors de l'épaisseur de la couche d'air à température négative : si cette épaisseur est suffisante, du grésil est observé au sol, sinon, on observera une pluie verglaçante (l'eau reste en surfusion et ne gèle qu'au contact du sol).

On s'aperçoit donc que la température est un facteur fondamental pour la détermination de la nature des précipitations. Néanmoins, ce n'est pas le seul. Murray en 1952 (cité dans Valéry, 2010) a montré que la nature des précipitations peut être fonction de divers autres facteurs météorologiques. Nous citerons, par exemple, l'altitude de l'isotherme 0°C ou encore la largeur des couches 1000-700 mb ou 1000-500 mb. Par ailleurs, en montagne, les proportions de pluie et de neige observées vont dépendre fortement de l'altitude et de la latitude (US Army Corps of Engineers, 1956, cité dans Valéry, 2010).

D'autres éléments tels que l'intensité des précipitations ou la vitesse du vent peuvent venir complexifier la détermination de la nature des précipitations. En pratique, il est possible d'observer de la neige à température positive et, inversement, de la pluie à température négative. Ainsi, la

détermination de la nature des précipitations n'est pas une mince affaire : elle dépend d'un nombre important de facteurs, tous n'étant pas mesurés ou mesurables, même s'il convient de retenir la température comme facteur prépondérant.

I.1.2 Comportement de la neige au sol

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). L'évolution du manteau neigeux nécessite la compréhension des processus physiques de la fonte de la neige. Nous touchons ici à la thermodynamique du manteau neigeux, sujet complexe qui démarre dès l'accumulation jusqu'à la disparition du stock en passant par la métamorphose de la neige (Llamas, 1993, cité dans Valéry, 2010).

La fonte est le résultat de nombreux transferts de chaleur et de masse entre le manteau neigeux et son environnement (atmosphère et sol). L'importance des différents processus responsables de ces transferts est variable, en fonction du lieu (forêt/clairière, zones tropicales/hautes latitudes, etc.) et du moment (début/fin de saison de fonte, jour/nuit, etc.). L'US Army Corps of Engineers (1956) a répertorié l'ensemble des processus modifiant la quantité de chaleur au sein du manteau neigeux et contribuant à la fonte. Nous ne détaillerons pas ces processus mais Kuusisto (1999, cité dans Valéry, 2010) conclut que les rayonnements (radiations de faibles et fortes longueurs d'onde) et les échanges convectifs (sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente de vaporisation) sont les deux principaux facteurs à l'œuvre pour la fonte du manteau : les premiers étant prépondérant les jours de beau temps et dans des sites protégés (forêts), les seconds les jours nuageux ou pluvieux et dans des endroits non protégés.

A l'échelle du bassin versant, il est nécessaire de prendre en compte la variabilité spatiale du manteau neigeux. En effet, l'hétérogénéité des conditions sur le bassin versant va induire une hétérogénéité de la couverture neigeuse sur celui-ci. Rappelons que l'un des domaines privilégiés pour la neige est le domaine montagnard, qui présente très certainement les plus importantes hétérogénéités à petite échelle. Nous pouvons distinguer, d'une part, la variabilité des conditions météorologiques et, d'autre part, l'hétérogénéité des caractéristiques physiographiques du bassin. La première, combinée à la topographie, joue un rôle prépondérant sur la répartition du couvert neigeux. Les gradients altitudinaux de température et de précipitations favorisent une accumulation plus importante de neige pour les altitudes élevées. Le vent permet, quant à lui, la prise en charge de la neige et sa redistribution. En ce qui concerne l'hétérogénéité de la physiographie du bassin, elle accentue la disparité du couvert neigeux. On retrouvera des quantités plus importantes, et plus durables, de neige dans les dépressions. L'exposition du versant aura une influence sur la disparition du manteau neigeux (plus rapide à l'adret qu'à l'ubac). De fortes pentes vont favoriser les avalanches et grossir le stock en aval. Enfin, la végétation, en tant que protection contre le vent, aura également un effet sur la redistribution de la neige.

I.2 Des difficultés pour la modélisation hydrologique

Nous nous intéressons ici aux besoins et aux manières de prendre en compte la neige dans la modélisation hydrologique. 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, par exemple). 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 (Hingray *et al.*, 2009). 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). 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.

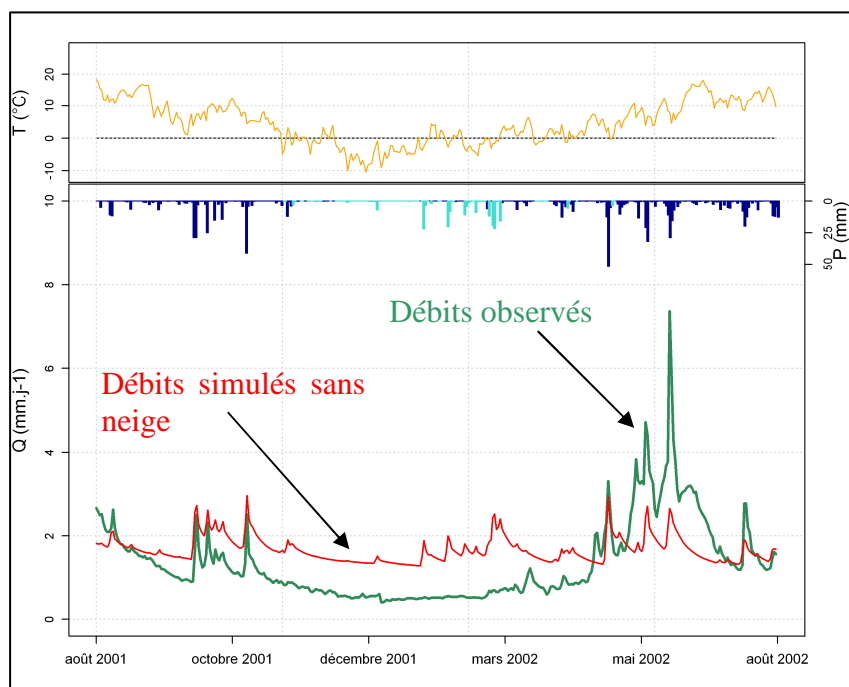


Figure 1 : Débits observés et simulés avec le modèle GR4J (sans module neige) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon (3580 km²) pour la période d'août 2001 à août 2002 (tiré de Valéry, 2010)

Pour la bonne prise en compte de la neige dans la modélisation hydrologique, il faut d'abord pouvoir quantifier la part des précipitations solides à l'échelle du bassin versant. La distinction entre pluie et neige n'est cependant pas toujours disponible dans les enregistrements de précipitations, la mesure de la quantité de neige précipitée présentant de nombreuses difficultés d'ordre météorologique (erreurs de mesures jusqu'à 110% selon Barry, 2008). Par ordre d'importance pour la modélisation de l'hydrologie en montagne (selon Klemes, 1990, cité dans Valéry, 2010), les principaux problèmes d'estimation de la neige à l'échelle du bassin versant sont les suivants :

- le manque d'accessibilité :
le réseau de mesure est souvent installé dans des zones faciles d'accès, en vallée, et délaisse les reliefs, ce qui provoque des lacunes importantes sur la connaissance des conditions météorologiques en altitude.
- les problèmes météorologiques :
les instruments de mesure biaisent la mesure de la précipitation (sous-estimation liée à l'effet du vent ou à l'évaporation, problème de représentativité de la mesure ponctuelle) et encore plus pour la précipitation solide.
- la représentativité du réseau de mesure (elle est liée aux deux points précédents) :
les réseaux de mesures sont trop éparés et mal répartis (exposition, altitude) sur les bassins versants, alors que l'on observe une grande variabilité spatiale en termes de précipitations, de températures et des caractéristiques de ces milieux (topographie, végétation, type de temps, etc.).

Dans plusieurs cas, c'est donc au modélisateur de faire cette distinction à partir d'autres variables. Il doit trouver le moyen d'estimer au mieux les lames d'eau précipitées sur le bassin pour assurer le meilleur fonctionnement du modèle.

Il existe une multitude de manières de traiter la neige en modélisation. Ainsi, nombreux sont les modules neige présentés dans la littérature, presque autant que les modèles hydrologiques. Ceux-ci traitent de manière différente la détermination de la nature des précipitations, ainsi que la fonte et son routage (transfert à l'exutoire du bassin versant). En effet, plusieurs approches sont possibles afin de traiter chacun de ces objets, des approches physiques aux plus conceptuelles.

Pendant les travaux de thèse de Valéry (2010), un module neige a été développé au Cemagref selon une approche ascendante (structure simple que l'on complexifie progressivement), en s'inspirant des forces et faiblesses de modules existants dans la littérature, à savoir, les modules existants dans les modèles hydrologiques MORDOR, NAM, HBV, CEQUeau et MOHYSE (références disponibles dans Valéry, 2010). Ce sont tous des modèles qui ont été développés pour des objectifs variables (ingénierie, étude de la ressource en eau, prévision, etc.), avec des applications sur des zones géographiques différentes (Suède, France, Canada, etc.). Ils présentent un nombre variable de paramètres libres (de 2 pour MOHYSE à 10 pour MORDOR). L'objectif de la thèse de A. Valéry était de développer un module neige parcimonieux, robuste, général et performant dans différents environnements. Cette étude a été effectuée sur un échantillon de 380 bassins versants répartis dans 4 pays : France, Suisse, Suède et province canadienne de Québec. Le module, baptisé Cemaneige, a été testé et intégré au modèle de simulation GR4J et a présenté des résultats très encourageants par rapport aux autres modules testés, compte tenu du faible degré de liberté dont il dispose (3 paramètres libres seulement). L'adaptation de ce module au modèle de prévision hydrologique GR3P constitue le sujet de l'étude ici reporté. Nous détaillons donc le module Cemaneige dans la Partie II de ce mémoire (Outil, données et méthodes). L'apport du module neige est ici évalué dans le cadre de la prévision hydrologique, plus particulièrement de la prévision d'ensemble, dont quelques rappels sont présentés dans le paragraphe suivant.

1.3 La prévision d'ensemble

Pour prévoir des débits à partir d'un modèle hydrologique, il est nécessaire de prévoir les entrées nécessaires à son fonctionnement. Ainsi, les modèles météorologiques jouent un rôle important. Malheureusement, la capacité de ces modèles à prévoir des événements extrêmes et particuliers reste faible et les incertitudes associées peuvent être importantes. Par ailleurs, la fiabilité des prévisions météorologiques diminue avec l'augmentation de l'échéance de prévision. Ainsi, la prévisibilité³ est estimée à moins de 3 jours pour une prévision déterministe fiable aujourd'hui. L'une des sources d'erreur qui limite cette prévisibilité est liée à l'inexactitude des données d'observation qui définissent l'état initial de l'atmosphère, utilisé dans la modélisation. Pour palier à cela, des systèmes de prévision d'ensemble ont été développés par plusieurs centres météorologiques dans le monde.

Dans la prévision météorologique d'ensemble, plusieurs états initiaux sont définis, à partir de petites variations imposées aux données observées, plus petites que les erreurs normales de mesures ou d'interpolation. La modélisation de l'atmosphère est effectuée à partir de chacun de ces états initiaux. Ainsi, on obtient autant d'états futurs de l'atmosphère que de "scénarios" de l'état initial. Les états finaux obtenus peuvent être très divergents, du fait du caractère chaotique de l'atmosphère : deux états initiaux proches peuvent aboutir à des prévisions très différentes. Plusieurs valeurs prévues sont obtenues à partir de ces scénarios d'évolution de l'atmosphère considérés comme équiprobable : chaque scénario à une probabilité de 1 sur le nombre total de scénarios modélisés de survenir. La probabilité des événements météorologiques et l'incertitude de chaque situation prévue

³ La prévisibilité est le délai au-delà duquel on estime qu'un modèle sera trop éloigné de la réalité pour être fiable.

est comprise dans ces prévisions pour des échéances allant jusqu'à 10-15 jours. Il est ainsi possible d'étendre les échéances de prévisions et mieux anticiper les événements à risque.

En hydrologie, l'utilisation de la prévision météorologique d'ensemble est encore peu fréquente, même si elle tend à se développer. On notera l'initiative du système européen d'alerte aux crues (EFAS), lancé en 2003 par la Commission Européenne (Thielen *et al.*, 2009). Dans le but d'augmenter le temps de préparation aux inondations dans les bassins fluviaux transnationaux à partir de la prévision de crue à moyenne échéance (3 à 10 jours), EFAS fournit une pré-alerte à partir de quatre seuils critiques et utilise notamment le système de prévision d'ensemble du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT - ECMWF en anglais) (Ramos *et al.*, 2009). Une autre initiative européenne importante est celle de MAP D-PHASE, un acronyme pour "Mesoscale Alpine Program Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alps" (Ranzi *et al.*, 2009). Au niveau international, HEPEX⁴ ("Hydrologic Ensemble Prediction Experiment") rassemble les communautés météorologiques et hydrologiques pour mener des recherches sur la promotion de techniques de prévisions hydrologiques probabilistes. Cela permet d'accroître la communauté scientifique sur le sujet, et de pouvoir étudier le comportement des prévisions d'ensemble dans des environnements différents.

En France, la prévision hydrologique d'ensemble a déjà été testée sur la chaîne de modèles SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) à Météo-France avec deux types de prévisions météorologiques d'ensemble : les 51 scénarios issus du système de prévision d'ensemble du Centre européen CEPMMT (EPS) à 10 jours d'échéance, et les 11 scénarios issus du modèle ARPEGE (PEARP) à 2 jours d'échéance (Rousset-Regimbeau *et al.*, 2007 ; Thirel *et al.*, 2008). L'utilisation de la PEARP en hydrologie a également été étudiée par Randrianasolo (2009) et Randrianasolo *et al.* (2010), en entrée au modèle hydrologique GR3P développé au Cemagref. Dans cette étude, nous utilisons également les prévisions PEARP, décrites en détail dans la Partie II de ce mémoire.

Dans la prévision hydrologique d'ensemble, il est important non seulement de bien prendre en compte les différentes sources d'incertitude, mais aussi de pouvoir évaluer la qualité des prévisions émises. En météorologie, la terminologie "vérification des prévisions" est souvent utilisée et fait référence à l'utilisation de nombreuses mesures statistiques d'écart entre les prévisions et les observations, appelés "scores" (Jolliffe et Stephenson, 2003). En effet, pour la vérification des prévisions, il est nécessaire de disposer d'une longue série de paires d'évènements prévus-observés. L'utilisation d'un seul évènement ne permet pas de vérifier statistiquement que les probabilités induites par les prévisions sont fiables et non biaisées. Quelques outils de vérification couramment utilisés en prévision "normale" (c'est-à-dire, déterministe, où un seul scénario futur est disponible) peuvent être utilisés, mais, dans ce cas, on considèrera alors chaque scénario comme une prévision déterministe ou le scénario donné par la moyenne des scénarios de la prévision d'ensemble. Néanmoins, il paraît plus judicieux d'exploiter les avantages qu'offre la prévision d'ensemble et vérifier la fiabilité de la distribution de probabilité des évènements possibles. Pour cela, des scores probabilistes ont été développés. Certains seront utilisés dans cette étude et sont présentés dans la Partie II de ce mémoire (Outils, données et méthodes).

⁴ <http://hepex.jrc.ec.europa.eu/>

Deuxième partie : Données, outils et méthodes

II.1 Les données utilisées

Cette étude s'intègre dans la continuité des travaux effectués au Cemagref, qui utilisent une large base de données pour développer des outils ou évaluer de nouvelles méthodes. L'avantage est de pouvoir généraliser les résultats obtenus sur des bassins qui présentent des conditions sensiblement similaires. Ainsi, notre premier choix s'est porté sur l'utilisation d'une partie de la base de données établie par Valéry (2010), concernant 219 bassins versants localisés en France, pour créer son module neige. Cela nous permettait d'utiliser quelques données déjà préparées pour le module neige, notamment la courbe hypsométrique de chaque bassin.

Un problème de recoupement temporel des données nous a cependant amené à rechercher une autre source de données hydrométéorologiques. En effet, les données disponibles couvraient la période du 01/08/1995 au 31/07/2005, alors que les données d'entrée de prévision dont nous disposons commencent à partir du 10/03/2005. Ainsi, compte tenu de la trop petite fenêtre temporelle commune aux deux bases, une nouvelle source de données a été recherchée. Il s'agit de la base de données de 3000 bassins versants récemment mise en format au Cemagref, couvrant la période 1958/2009. Cette base contient 179 des 219 bassins étudiés par Valéry (2010). Puisque cette nouvelle base de données a été extraite récemment, nous l'avons validé avant de l'utiliser. Pour cela, nous avons comparé les deux bases de données entre elles sur la période commune du 01/08/1995 au 31/07/2005. Les résultats nous ont amené à écarter trois des 179 bassins, pour lesquels des données fortement douteuses de débit (différences importantes des valeurs reportées) ont été détectées. Nous avons également identifié quelques différences sur les précipitations, vraisemblablement liées à des divergences dans les méthodes de spatialisation des précipitations. Une analyse préliminaire de la performance du modèle GR3P, sans module neige, sur les bassins a permis de voir que les différences observées n'avaient cependant pas d'impact significatif sur les performances du modèle. De ce fait, nous avons donc décidé de garder ces 176 bassins pour nos recherches.

II.1.1 Les données observées

Nous utilisons des données couramment utilisées dans la modélisation hydrologique, à savoir les précipitations, les températures de l'air, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les débits. Notre étude concernant la prévision au pas de temps journalier, ce sont donc des données journalières que nous utiliserons. De plus, pour l'utilisation dans la modélisation hydrologique globale, les données spatialisées ont été agrégées à l'échelle du bassin versant (pluie et ETP moyenne de bassin). Les précipitations et les températures proviennent de la base de données issue du système d'analyse météorologique SAFRAN de Météo-France (Quintana-Ségui *et al.*, 2008, Vidal *et al.*, 2009). Les données sont disponibles partout en France sur une grille de résolution 8×8 km. L'ETP utilisée est celle calculée à partir de la formule d'Oudin (Oudin *et al.*, 2005) (**équation 1**), qui fournit une ETP journalière pour la modélisation :

$$ETP(j) = \frac{R_e}{\lambda \times \rho} \times \frac{T_a(j) + 5}{100} \quad \text{si } T_a(j) + 5 > 0$$
$$= 0 \quad \text{sinon}$$
Eq. 1

où λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2.25 MJ.kg^{-1}), ρ la masse volumique de l'eau (103 kg.m^{-3}), R_e le rayonnement extraterrestre (en $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) calculé à partir de la latitude du bassin (prise à l'exutoire ici) et du jour Julien, et $T_a(j)$ la température de l'air du bassin pour le jour considéré, donnée par les valeurs disponibles dans la base SAFRAN.

Les débits quotidiens sont issus de la banque de données HYDRO⁵ du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). Elle fournit des données de plus de 3000 stations de jaugeages sur des cours d'eau français. Toutes ces données sont déjà sous format et disponibles au Cemagref.

La **figure 2** présente trois exemples de chroniques de précipitations, températures et débits observés en 2004 sur les bassins de l'Isère à Val d'Isère, l'Ire à Doussard et la Faye à Olliergues.

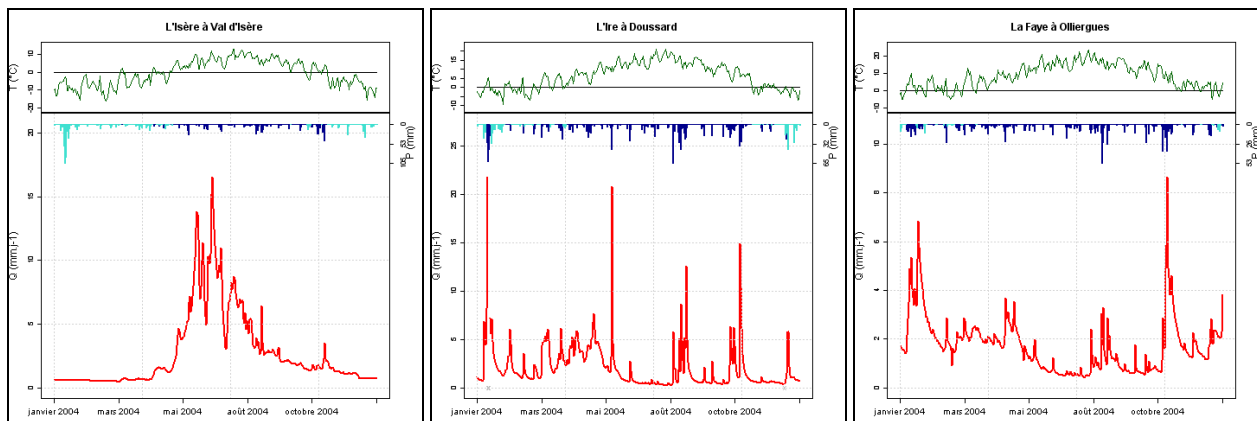


Figure 2 : Exemples de chroniques de précipitations (pluie en bleu foncé, neige en bleu clair), températures (vert) et débit (rouge) sur les bassins de l'Isère à Val d'Isère (46 km²), l'Ire à Doussard (25 km²) et la Faye à Olliergues (72 km²) en 2004

II.1.2 Les prévisions d'ensemble

La prévision météorologique à Météo-France concerne des échelles spatiales et temporelles variées. Elle est issue principalement de la modélisation numérique, mais l'expertise et les observations jouent un rôle non négligeable, notamment lorsqu'il s'agit de prévision à court terme ou la prévision immédiate (quelques heures). Avec l'augmentation de l'échéance de prévision (quelques jours), l'utilisation de modèles numériques de prévisions devient incontournable. Trois gammes de modèles sont actuellement utilisées par Météo-France, différenciées par la taille du maillage géographique et par l'échéance de prévision, et se complètent en "s'emboîtant". Les données que nous utilisons proviennent du modèle ARPEGE, qui travaille avec un maillage de 25 km² (Thirel, 2009). C'est un modèle dit "global", qui calcule l'évolution de l'atmosphère sur l'ensemble du globe, et qui couvre 102 heures d'échéance (environ 4 jours).

Le système de prévision d'ensemble de Météo-France est appelé PEARP (Prévisions d'Ensemble ARPEGE, Nicolau, 2002). Il a été testé et utilisé dans plusieurs études hydrologiques récentes : Thirel (2009), pour l'amélioration de la prévision d'ensemble des débits sur la France avec le modèle SIM ; Randrianasolo (2009) pour l'évaluation de la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble basées sur les modèles GRP et SIM. La PEARP est composée de 11 scénarios équiprobables de prévision à 60 heures d'échéance, dont un membre est dit "de contrôle" (il part de la condition initiale la plus favorable, proche de celle qui serait utilisée par une prévision déterministe). Dans notre étude nous utiliserons les prévisions de précipitations (pluie et neige) et de températures de la PEARP. Les données des mailles de la PEARP (64 km²) sont agrégées sur nos bassins (moyenne pondérée par les superficies des mailles appartenant au bassin). Les prévisions sont lancées à 18h le jour j d'émission de la prévision et disponibles au pas de temps tri-horaire. Elles sont ensuite agrégées pour fournir des jours entiers (0 à 24 h) pour l'échéance journalière 1 (j+1) et l'échéance 2 (j+2). La **figure 3** présente un exemple de prévision d'ensemble sur la France : 11 cartes (P1 à P11) représentent les différents scénarios fournis par la prévision d'ensemble PEARP, avec P1 le membre de contrôle. Les prévisions ont été émises le 30/10/2008 pour le 02/11/2008 (j+2). La 12^{ème} carte (Pobs) présente la pluie observée SAFRAN pour la même

⁵ <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

date de prévision. On observe sur cette carte des différences de répartition dans les scénarios de précipitations prévues, avec des zones parfois arrosées, parfois non, et des quantités précipitées plus ou moins importantes avec des maxima différemment localisés.

L'une des sources d'erreur dans la prévision hydrologique est directement imputable aux erreurs de la prévision climatique. Pour palier à cela, des scénarios climatiques équiprobables peuvent être utilisés en entrée du modèle précipitation-débit dans le but de fournir des scénarios équiprobables de prévision hydrologique. Dans cette étude, les 11 scénarios de la PEARP sont utilisés en entrée du modèle GRP (sans et avec module neige) et les 11 prévisions hydrologiques d'ensemble résultantes sont évaluées. Pour cela, nous disposons d'une archive de prévisions qui s'étend du 10/03/2005 au 30/09/2009. Une partie de cette archive a été utilisé par Randrianasolo (2009), qui a évalué les prévisions hydrologiques de 211 bassins, non ou peu influencés par la neige, sur la période allant jusqu'à juillet 2006. Ici, nous nous focalisons sur des bassins influencés par la neige et sur une période plus longue d'évaluation, du 10/03/2005 au 31/07/2009, pour laquelle des observations sont également disponibles.

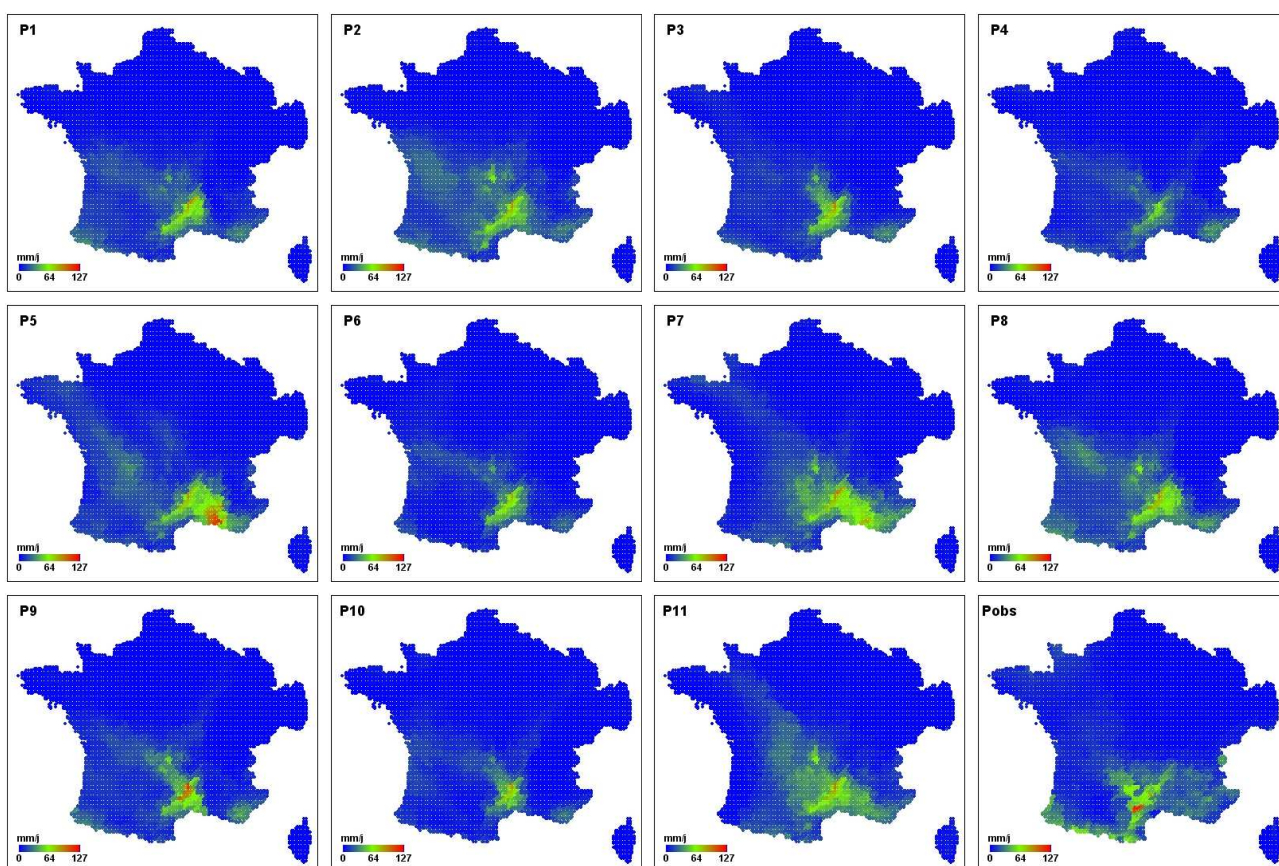


Figure 3 : Prévisions d'ensemble ARPEGE (PEARP) à 2 jours d'échéance (P1 à P11, pour les 11 membres de l'ensemble) et observations SAFRAN (Pobs) pour les précipitations du 02/11/2008 sur la France.

II.1.3 Les bassins versants de l'étude

Les 176 bassins utilisés sont tous des bassins de montagne français, localisés sur les reliefs du Massif Central, du Jura, des Alpes et des Pyrénées (**figure 4**). 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, privilégié ;
- une certaine hétérogénéité de l'échantillon en termes de caractéristiques physiographiques, climatiques et hydrologiques, comme le montre le **tableau 1**.

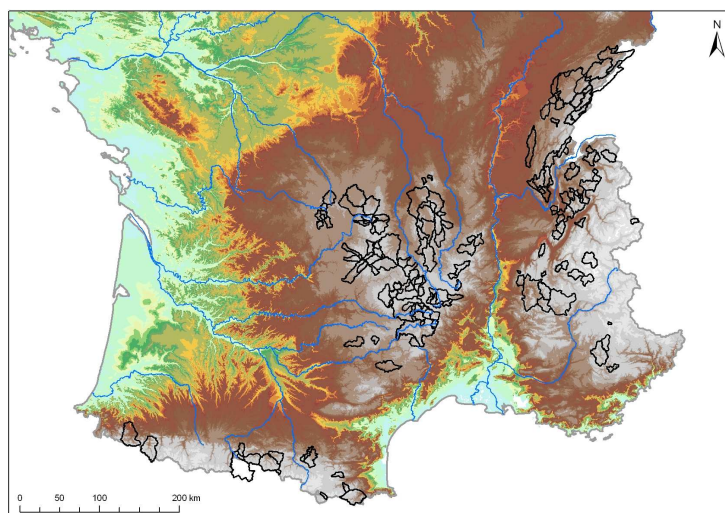


Figure 4 : Carte de localisation des 176 bassins versants étudiés

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

Superficie (km ²)	Zmed (m)	ΔZ (m)	P (mm/an)	Q (mm/an)	ETP (mm/an)	Neige (mm/an)	% Neige
[5 ; 2210]	[386 ; 2681]	[133 ; 2644]	[763 ; 2287]	[233 ; 2070]	[280 ; 714]	[12 ; 740]	[1 ; 51]
105	1035	833	1357	671	588	87	7

II.2 Caractérisation des régimes hydrologiques des bassins versants

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 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.

II.2.1 Rappels sur les régimes hydrologiques

Tout d'abord, il paraît essentiel de rappeler ce qu'est un régime hydrologique. Pardé, dans son ouvrage *Fleuves et rivières* (1955), définit le régime hydrologique comme "l'ensemble des phénomènes qui concernent l'alimentation des cours d'eau et les variations de leurs débits". C'est également, dans le glossaire international d'hydrologie⁶, "l'ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple saisonnières".

Le régime hydrologique est le reflet des facteurs influençant l'écoulement tels que les précipitations, la température, le relief, la nature du bassin versant, etc. (Musy et Higy, 2004). Ce sont généralement les variations saisonnières des débits qui vont permettre la classification en différents régimes hydrologiques, car elles permettent de traduire visiblement l'action de ces différents facteurs (Pardé, 1955). Le régime hydrologique est ainsi souvent représenté par un hydrogramme des 12 coefficients mensuels de débit (rapport de chaque moyenne mensuelle au module).

Il existe plusieurs types de régimes hydrologiques, fondés principalement sur le mode d'alimentation du cours d'eau (i.e., pluvial, nival, glaciaire). Pardé (1955) en distingue trois grandes catégories :

- Les **régimes simples**, qui comportent deux saisons hydrologiques (abondance et pénurie). Ils indiquent la prépondérance d'un seul mode d'alimentation, donc un bassin homogène au

⁶ <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>

point de vue du climat. On y distingue les régimes glaciaire, pluvial océanique, pluvial tropical, nival de montagne et nival de plaine.

- Les *régimes complexes originels*, qui comportent au moins quatre et plus rarement six phases hydrologiques (2 ou 3 minima et maxima). Ils résultent des effets combinés, et plus souvent successifs de deux ou trois modes d'alimentation (ex., le ruissellement pluvial d'automne et le facteur nival en printemps). On y distingue les régimes de type nival de transition, nivo-pluvial et pluvio-nival, ainsi que les sous-types jurassien et méditerranéen, par exemple.
- Les *régimes complexes changeants*, qui comprennent des cours d'eau soumis à un régime simple ou complexe originel dans sa partie supérieure et subissant l'influence de facteurs variés, parfois contradictoires.

On pourrait arguer que cette classification date de plus d'une cinquantaine d'année, cependant elle est encore utilisée dans les pays francophones (Musy et Higy, 2004). De plus, elle a été enrichie depuis en introduisant des nuances locales et sur la base de données complémentaires. D'autres classifications ont ainsi été proposées, basées sur des aspects quantitatifs, donc plus objectives. Par exemple, Haines *et al.* (1988) (cité dans Musy et Higy, 2004) proposent une typologie basée sur un indice de similarité entre des débits moyens mensuels interannuels. Krasovskaïa et Gottschalk (1996) (cité dans Musy et Higy, 2004) proposent une détermination analytique du régime par le calcul d'un indice de stabilité de l'occurrence des périodes d'étiages et de hautes eaux (Musy et Higy, 2004). Plus récemment, Sauquet (2006) a proposé une classification des régimes hydrologiques des cours d'eau français, basée sur la similitude entre les régimes de 872 bassins versants et la distribution annuel des écoulements mensuels.

Enfin, on soulignera la multiplicité des types de régime existants, ainsi que la difficulté d'en interpréter les causes pour les régimes complexes, tant ceux-ci sont à étudier au cas par cas. De plus, il n'y a pas de classification unique et la majorité des classifications proposées reste difficilement traduisible sous forme d'algorithme, pour permettre une évaluation automatique sur un grand nombre de cours d'eau. Le classement d'un régime garde ainsi une part de subjectivité et reste à l'appréciation de l'hydrologue. En ce qui nous concerne, c'est la classification établie par Sauquet (2006), détaillée ci-après, que nous allons utiliser. Ce choix s'est opéré principalement de par le terrain d'étude sur lequel la classification a été développée, qui correspond le mieux au notre, ce qui devrait assurer une certaine cohérence des résultats.

II.2.2 La classification de Sauquet (2006)

Sauquet (2006) a étudié une classification de régimes hydrologiques à partir de l'analyse statistique des chroniques de débits mensuels de 872 stations de jaugeage de cours d'eau français, sur la période 1981-2000. Cette classification repose sur le principe simple de similitude, selon une stratégie de regroupement qui s'appuie sur la méthode de Ward (minimisation des distances intra-classes, maximisation des distances inter-classes). Le choix du nombre de classes repose ensuite sur des considérations *pratiques* (le nombre de classes ne doit pas être trop important pour correspondre à une vision synthétique), *numériques* (identification de sauts de distance entre les groupes en fonction du nombre de classes) et *hydrologiques* (possibilité d'isoler les composantes pluviale/nivale des bassins à partir de trois groupes et de faire apparaître des bassins cévenols à partir de 7 groupes). Neuf groupes ont été retenus, et le neuvième a été subdivisé en 4 pour obtenir un total de 12 groupes, différenciés par la saisonnalité des étiages/hautes eaux et par leur caractère plus ou moins soutenu. Sauquet (2006) souligne que les régimes 9 à 12 sont inspirés de la classification de Pardé (1955), du fait du relativement faible nombre de bassins à dominante nivale dans l'échantillon utilisé pour cette classification et de la nécessité de séparer des régimes trop différents pour être classés dans un même groupe. Enfin, il est important de noter que les nuances locales ne sont pas prises en compte dans cette classification à pertinence nationale (Sauquet, 2006).

Les 12 régimes hydrologiques, avec un hydrogramme de référence pour chacun, sont illustrés dans la **figure 5**. Chaque hydrogramme représente le pourcentage mensuel du débit annuel (rapport de chaque moyenne mensuelle au débit annuel). Cette représentation offre l'avantage de pouvoir comparer les régimes entre eux et de pouvoir être plus facilement appliquée à d'autres cours d'eau que l'on souhaite classifier. Malgré le fait que cette classification n'ait pas été établie à partir de l'origine des écoulements comme l'est celle de Pardé, excepté pour les groupes 9 à 12 extraits de cette dernière, on peut néanmoins extraire une dominante dans les processus d'alimentation : pluviale pour les groupes 1 à 8, nivale pour les groupes 9 à 12 (Sauquet, 2006).

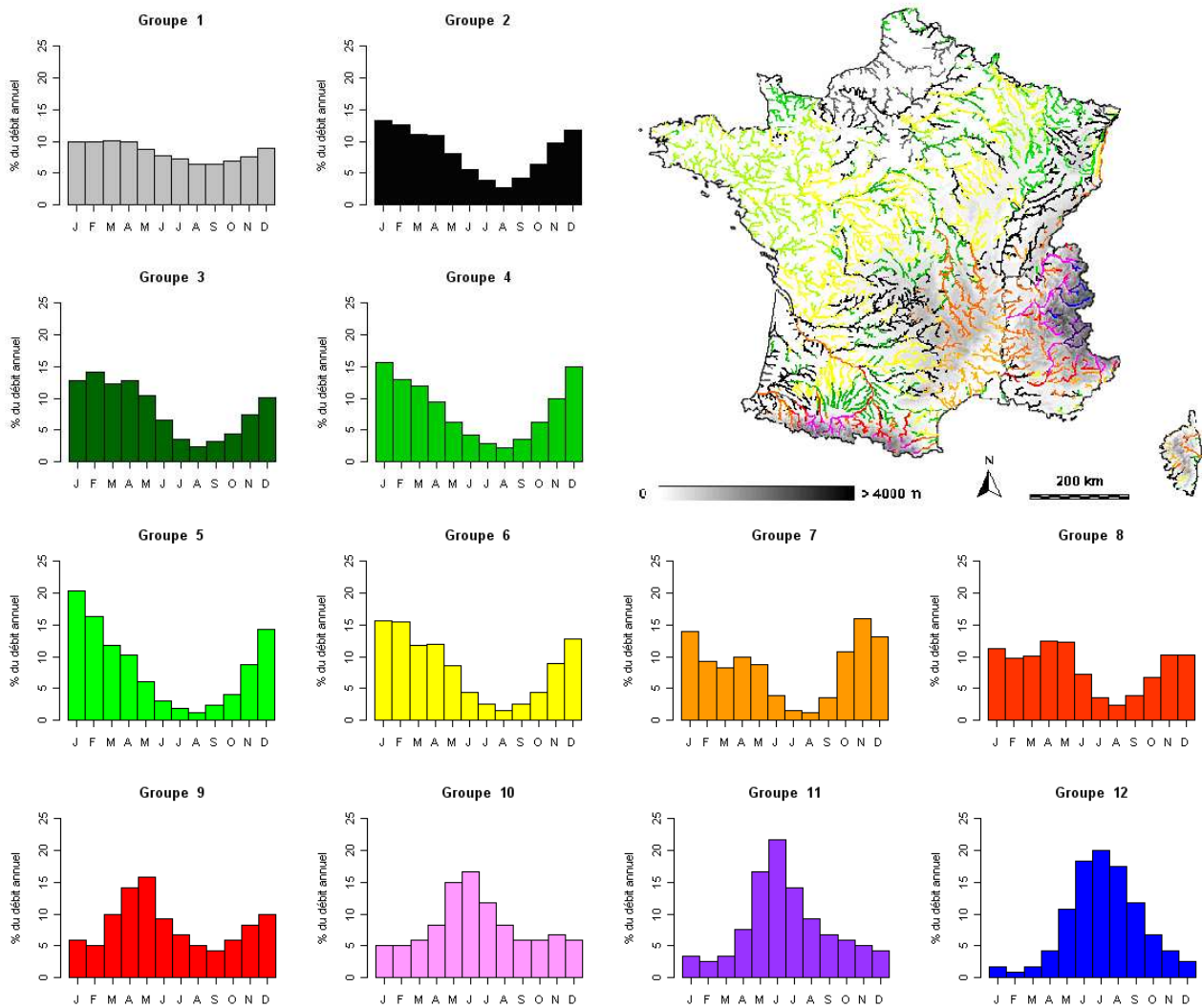


Figure 5 : Hydrogrammes de référence pour les 12 groupes de régimes hydrologiques proposés par la classification de Sauquet (2006) et carte de France (d'après Sauquet, 2006)

Selon Sauquet (2006), pour cette classification, "l'interprétation hydrologique précise des processus dominants est une tâche délicate indépendante, à réaliser a posteriori à partir d'informations complémentaires". Néanmoins, la carte de France des régimes hydrologiques présentée par Sauquet (2006), et ici reproduite dans la **figure 5**, permet d'établir quelques liens avec les processus hydrologiques au niveau national : des régimes à dominante nivale concentrés sur les Alpes et les Pyrénées, alors que les nuances des régimes à dominante pluviale s'expriment sur le reste du territoire. On y observe clairement un glissement progressif des régimes influencés par la fonte de la neige vers des nuances de régimes pluviaux d'amont en aval sur les secteurs montagneux (à noter que le signal de fonte persiste sur les grands cours d'eau lorsque ceux-ci traversent des secteurs de plaine, e.g., l'Isère jusqu'à sa confluence avec le Rhône). Plus régionalement, les écoulements sont presque uniformes toute l'année (groupe 1) dans le Nord de la France, où de larges aquifères modèrent l'écoulement. La Bretagne est relativement homogène et représenté par le groupe 5, où

l'on retrouve de très faibles écoulements en été, ce qui reflète le manque de stock d'eau souterraine profonde dans la zone. Le groupe 7 est représentatif des régimes des rivières méditerranéennes, où de petits bassins versants sont soumis à des étés chauds et secs et à des épisodes pluvieux automnaux intenses (étiages sévères en été et écoulements importants en novembre). Dans les régions montagneuses, les bassins versants les plus en altitude ont des régimes alimentés par la fonte des neiges (groupes 10, 11 et 12), et plus l'exutoire est élevé, plus la contribution de la fonte sera importante. Les groupes 8 et 9 apparaissent comme des régimes de transition : les variations saisonnières de l'écoulement sont affectées aussi bien par les précipitations que par la température et l'influence topographique (sur la formation du manteau neigeux et sa fonte) (Sauquet *et al.*, 2008).

II.2.3 Les régimes hydrologiques des bassins versants de cette étude

Sur la base des chroniques journalières de débits disponibles entre la période 1958-2009, nous avons évalué le régime hydrologique de chacun des 176 bassins versants de cette étude.

Pour le traitement des données, un code en langage de programmation R a été développé, qui a permis de classer rapidement et automatiquement les régimes. Pour cela, nous avons transformé les débits journaliers en débits mensuels moyens, puis en pourcentage du débit annuel, pour pouvoir les comparer aux hydrogrammes de référence de Sauquet (2006). De la même façon que pour la détermination des 12 groupes, l'appartenance d'un régime donné à un groupe s'effectue selon la distance euclidienne d au régime de référence, selon l'équation 2. Le régime hydrologique d'un cours d'eau appartiendra au groupe dont la distance euclidienne est minimale :

$$d = \min \left(\sqrt{\sum_{t=1}^{12} (\%Q(t) - \%Q_{ref}(t))^2} \right) \quad t = 1, \dots, 12 \text{ (mois de l'année)} \quad \text{Eq. 2}$$

où, $\%Q(t)$ est le pourcentage du débit annuel pour le mois t du régime à classer, et $\%Q_{ref}(t)$, le pourcentage du débit annuel pour le mois t du régime de référence.

Selon cette classification, l'échantillon des 176 bassins versants français se répartit comme le montre le **tableau 2**. Pour chaque groupe de régime, nous représentons également la température moyenne mensuelle et le pourcentage moyen de précipitation neigeuse par rapport à la précipitation totale observée sur chaque bassin (**figure 6**). Les précipitations ont été considérées comme neigeuses en dessous de la température seuil de 0°C.

Tableau 2 : Classification des 176 bassins versants de l'étude selon les régimes hydrologiques proposés par Sauquet (2006)

Régime	Dominante	Type	Nombre de BV		% BV	
1	Pluviale	Non défini	2	156	1.1	88.6
2			58		33.0	
3			3		1.7	
4			27		15.3	
5			1		0.6	
6			10		5.7	
7			29		16.5	
8			26		14.8	
9	Nivale	Nivo-pluvial	12	20	6.8	11.4
10		Nival de transition	4		2.3	
11		Nival	3		1.7	
12		Nivo-glaciaire	1		0.6	
Total			176		100	

D'après les résultats, on observe que l'échantillon de 176 bassins versants est plutôt représenté par des régimes à dominante pluviale (88.6 % de l'échantillon), avec des bassins où les précipitations neigeuses correspondent à entre 1% et 15% des précipitations totales. Le sous-échantillon de

bassins à dominante nivale (11.4 %) présente des bassins qui reçoivent des précipitations neigeuses plus importantes, susceptibles d'avoir une influence plus significative sur l'écoulement, notamment à des pas de temps plus fins que le mensuel.

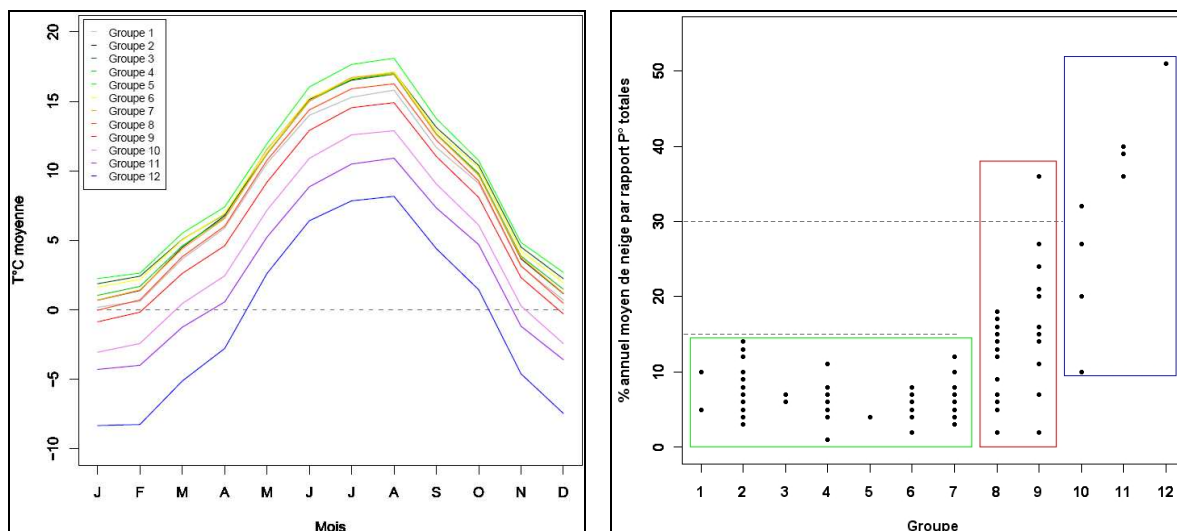


Figure 6 : Températures moyennes (à gauche) et pourcentage annuel moyen de neige par rapport aux précipitations totales (à droite) pour les 12 groupes de régime hydrologique constitués par l'analyse des 176 bassins versants de l'étude.

On peut également voir que notre échantillon n'est pas vraiment représentatif de toutes les classes : les groupes 5 et 12 ne possèdent qu'un représentant et 4 des 12 groupes représentent chacun moins de 2% du nombre de bassins. Il apparaît donc essentiel d'opérer un regroupement pour obtenir une classification avec des groupes plus statistiquement représentatifs. Nous avons choisi d'opérer un regroupement sur la base des informations disponibles concernant les températures moyennes mensuelles et la neige précipitée (**figure 6**). Un regroupement paraît difficile sur la base seule de l'analyse des températures. Néanmoins, deux groupes semblent pouvoir être dégagés : un amas des températures des régimes 1 à 9 que l'on pourrait classer ensemble, tandis que les groupes 10 à 12, où la température moyenne des mois d'hiver est clairement négative, formeraient un autre groupe. En ce qui concerne la répartition des pourcentages annuels moyens de neige par rapport aux précipitations totales, on dénote clairement 3 groupes :

- Un premier groupe (**a : dominante pluviale**) est constitué des régimes où la neige est inférieure à 15% des précipitations totales et comprend les régimes 1 à 7.
- Un second groupe (**b : transition**) est constitué des régimes où la neige est inférieure à 30% des précipitations totales, avec une exception à 35% pour le groupe 9 (1 seul bassin versant sur 16 classés sous ce groupe), et comprendrait ainsi les régimes 8 et 9.
- Enfin, un troisième groupe (**c : dominante nivale**) est constitué des régimes où la neige est supérieure à 10% des précipitations totales (régimes 10 à 12).

Les hydrogrammes présentés sur la **figure 2** montrent des bassins appartenant à chaque groupe : l'Isère à Val d'Isère appartient au groupe c (dominante nivale), l'Ire à Doussard au groupe b (régimes de transition) et la Faye à Olliergues au groupe a (dominante pluviale).

La **figure 7** présente les résultats de la classification en régimes hydrologique sous forme de carte de la région d'étude. Chaque point représente une station hydrologique de mesure pour laquelle un bassin versant est associé, donc également son exutoire. La taille des points permet d'apprécier la distance à chaque régime à titre indicatif (plus la distance est faible, plus le point est gros). Le regroupement en trois régimes est nettement plus satisfaisant en termes de représentativité, même s'il reste déséquilibré : les bassins à dominante pluviale représentent 73.8% de l'échantillon (130 bassins) et les bassins nivaux sont encore peu représentés, à 4.6% (8 bassins). Par ailleurs, d'une part, il procure l'avantage de gommer les nuances locales, trop visibles dans notre échantillon et difficilement explicables avec les données dont nous disposons. D'autre part, il permet le

regroupement des régimes en fonction de l'origine des écoulements : les régimes du groupe a sont alimentés principalement par la pluie, les régimes du groupe c, principalement par la fonte de la neige, et les régimes du groupe b, par les deux à la fois.

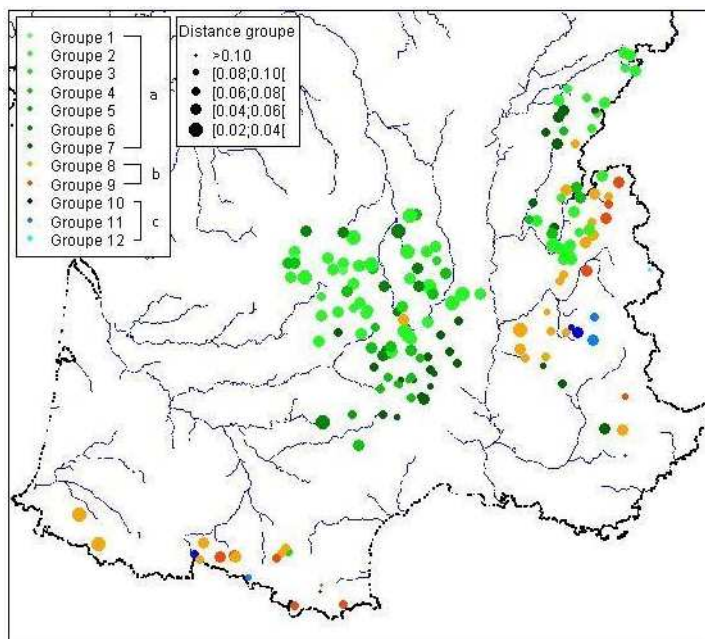


Figure 7 : Les régimes hydrologiques de 176 bassins versants à partir de la classification de Sauquet (groupes 1 à 12) et du regroupement fait dans cette étude (groupes a : dominante pluviale, b : transition et c : dominante nivale). La taille des points indique la distance à chaque régime : plus la distance est faible, plus le point est gros.

Finalement, on observe une répartition régionale de nos bassins, avec des régimes pluviaux concentrés sur le Massif Central et le Jura, des régimes nivaux sur les plus hautes altitudes des Alpes et des Pyrénées et des régimes de transition à des altitudes plus basses. On observe également clairement quelques "anomalies". En effet, dans le Jura, on peut voir que quelques régimes ont été classés dans le groupe 7, défini par Sauquet comme étant un régime de type méditerranéen. Il ne faut pas voir ici une erreur de classification, mais plutôt le fait que soit les processus dominants peuvent être différents tout en aboutissant au même résultat, soit la différenciation pour classer un régime dans l'un ou l'autre des groupes s'est faite sur peu de choses, voire les deux.

II.3 Vers un modèle de prévision avec prise en compte de la neige : GR5P

Le modèle de prévision avec prise en compte de la neige que nous voulons mettre en place et évaluer va en fait être constitué de deux modèles : le modèle de prévision GR3P, d'une part, et le module de prise en compte de la neige Cemaneige, d'autre part. Nous présentons ici ces deux modèles et comment ils vont interagir pour n'en former qu'un.

II.3.1 Le modèle de prévision : GR3P

Le modèle GR3P appartient à la famille des modèles hydrologiques GR (Génie Rural) développés au Cemagref. C'est un modèle de prévision à 3 paramètres libres, utilisable aux pas de temps horaire ou journalier. Il est dérivé du modèle de simulation pluie-débit GR4J (Perrin *et al.*, 2001, 2003) et a été initialement proposé par Tangara (2005). Le modèle est actuellement testé ou utilisé en opérationnel dans plusieurs Services de Prévision de Crues en France (SPC Grand Delta, Loire-Cher-Indre, DIREN IdF, etc.).

GR3P est un modèle:

- continu, c'est-à-dire qu'il utilise les conditions météorologiques passées au-delà de l'évènement en cours pour pouvoir initialiser les conditions d'humidité du bassin au moment de la prévision ;

- global, il ne prend pas explicitement en compte l'hétérogénéité spatiale du bassin (caractéristiques) ou des forçages météorologiques (précipitations et ETP). Nous verrons par la suite que l'introduction du module Cemaneige va introduire une étape de spatialisation en prenant en compte la variabilité topographique (altitude) du bassin qui se traduira par une meilleure estimation des moyennes spatiales sur le bassin ;
- qui possède une structure à réservoirs, ce qui l'apparente à un modèle conceptuel, bien que sa construction le classe entre modèle conceptuel et empirique.

La structure du modèle GR3P tel qu'il est utilisé dans cette étude (pas de temps journalier) est présentée dans la **figure 8**.

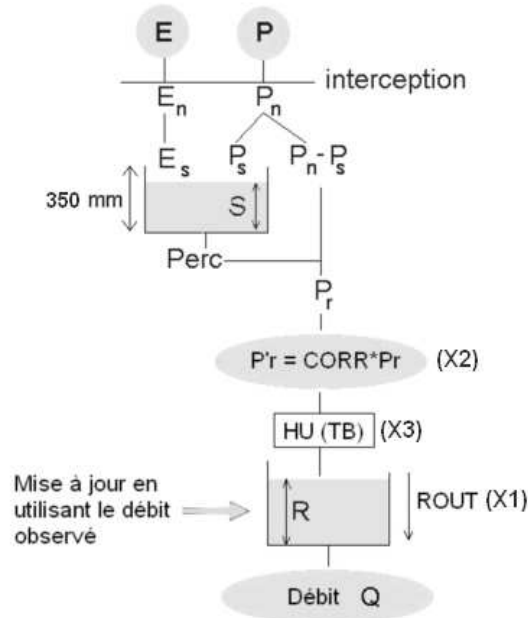


Figure 8 : Structure du modèle GR3P utilisé dans l'étude et ses trois paramètres libres : X1 (ROU), X2 (CORR) et X3 (TB) (d'après Tangara, 2005)

Le modèle GR3P fonctionne de la manière suivante : la pluie est neutralisée par l'évapotranspiration potentielle avant d'être intégrée à un réservoir de production. La capacité maximale de ce réservoir est fixée à 350 mm. Il 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 à l'aide du paramètre CORR (X2), qui permet 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 l'hydrogramme unitaire de temps de base TB (X3) 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 de capacité ROU (X1) 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. Dans la version horaire du modèle, une correction est également appliquée au débit prévu, en prenant en compte la dernière erreur de prévision faite par le modèle (Berthet *et al.*, 2009).

GR3P a été récemment adapté à la prévision d'ensemble (Ramos *et al.*, 2008) et testé sur des bassins français peu ou pas influencés par la neige (Randrianasolo *et al.*, 2010). Randrianasolo (2009) a d'ailleurs souligné dans ses travaux l'importance de prendre en compte la neige dans le modèle pour améliorer la qualité des prévisions.

II.3.2 Le module de prise en compte de la neige : Cemaneige

Afin d'intégrer le module CemaNeige au modèle de prévision hydrologique GR3P, il est essentiel de comprendre le fonctionnement du module, et donc sa structure. Ceci va nous permettre de connaître les données à introduire au module et comment celui-ci les traite.

CemaNeige est un modèle de prise en compte de la neige à 2 paramètres, avec une approche empirique (Valéry, 2010), c'est-à-dire, qui repose sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydrosystème considéré (Hingray *et al.*, 2009). Il vise à fournir une quantité d'eau issue de la fonte de la neige à un modèle hydrologique, dans le but d'en améliorer les performances pour des bassins influencés par la neige. Le module développé peut être facilement greffé en amont d'un modèle hydrologique. Il a été développé et testé pour les modèles de simulation (notamment GR4J), et non pas pour les modèles de prévision, comme nous le faisons ici. Dans ses conclusions, Valéry (2010) souligne, en particulier, les bonnes performances du module malgré sa parcimonie, qui lui confère *a priori* moins de flexibilité. Par ailleurs, ses résultats sur les bassins peu ou pas influencés par la neige ont été également encourageants pour notre étude, puisque la qualité des simulations était améliorée en moyenne.

CemaNeige 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 (Valéry, 2010). Ici, le choix a été porté sur une distribution du bassin en 5 zones altitudinales d'égales surfaces (**figure 9**). Chaque bande d'altitude a donc une altitude médiane qui lui est associée (à noter que l'altitude médiane de la troisième bande d'altitude est aussi celle du bassin versant).

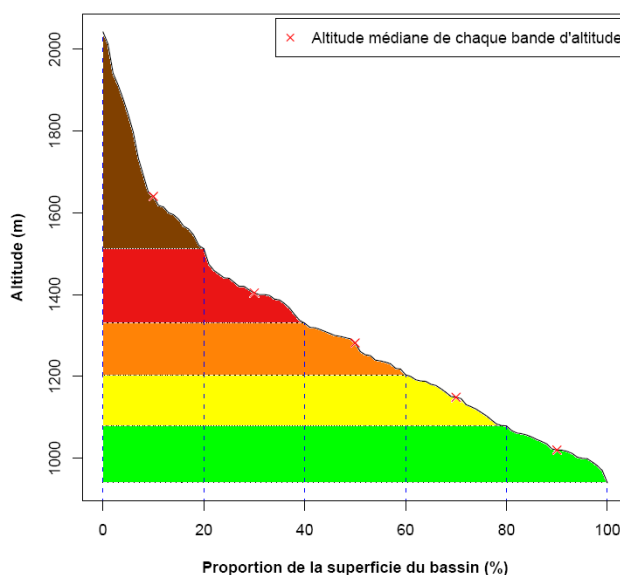


Figure 9 : Courbe hypsométrique et discrétisation spatiale en 5 bandes d'altitude (exemple du bassin de la Bourne aux Jarrands)

Extrapolation des données d'entrée par bandes d'altitude : précipitation et température

Cemaneige présente l'avantage de ne nécessiter que peu de données d'entrée pour fonctionner : les données de précipitations et de températures. Les données d'entrée sont extrapolées à chaque bande d'altitude notée z . Une transformation de la pluie de bassin est effectuée, selon la formule :

$$P_z = P \times \exp[\beta_{altitude} \times (Z_z - Z_{med_BV})] \quad \text{Eq. 3}$$

où P_z est la quantité précipitée sur la bande d'altitude z considérée (en mm), P , la pluie de bassin fournie en entrée (en mm), Z_z , l'altitude médiane de la bande d'altitude z , Z_{med_BV} , l'altitude médiane du bassin versant et $\beta_{altitude}$, est un facteur de correction altitudinal constant (égal à 4.1×10^{-4} en France, d'après Valéry, 2010).

Les températures (moyennes, minimales et maximales) du bassin sont également extrapolées selon la formule :

$$T_z = T + \theta_{altitude}(j) \times (Z_z - Z_{med_BV}) \quad \text{Eq. 4}$$

où T_z est la température sur la bande d'altitude z (en Kelvin), T , la température moyenne sur le bassin (en Kelvin) et $\theta_{altitude}$, un gradient altitudinal qui peut varier selon le jour j considéré (préconisé) (compris entre -0.428 °C/100 m en décembre et -0.602 °C/100 m en juin, d'après Valéry, 2010) ou être pris constant sur l'année (dans ce cas, la valeur -0.54 °C/100m est indiquée par Valéry, 2010, pour la France).

Nous ne détaillerons pas ici la méthode de spatialisation qui pourrait constituer l'objet d'un mémoire à part entière, néanmoins nous invitons le lecteur à se reporter à la thèse de Valéry (2010) pour de plus amples renseignements concernant la détermination de $\beta_{altitude}$ et $\theta_{altitude}$.

Nature des précipitations : pluie / neige

Le module possède deux fonctions de différenciation de la nature des précipitations suivant l'altitude médiane du bassin versant considéré (Valéry, 2010) :

- Si l'altitude médiane du bassin versant est inférieure à 1500 m, la fraction solide⁷ des précipitations est fonction des températures minimales et maximales journalières pour une bande d'altitude donnée. C'est une fonction utilisée dans les modules Hydrotel (Turcotte *et al.*, 2007, cité dans Valéry, 2010) ou PRMS (Leavesley et Stannard, 1995, cité dans Valéry, 2010) et qui détermine la part de neige comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Si } T_z \text{ max} \leq 0^\circ\text{C}, \text{FracNeige}_z &= 1 \\ \text{Si } T_z \text{ min} \geq 0^\circ\text{C}, \text{FracNeige}_z &= 0 \\ \text{Sinon, } \text{FracNeige}_z &= 1 - \frac{T_z \text{ max}}{T_z \text{ max} - T_z \text{ min}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

où $T_z \text{ min/max}$ est la température minimale/maximale journalière de la bande d'altitude z considérée, et FracNeige_z , la part de neige par rapport aux précipitations de la même bande d'altitude.

- Si l'altitude médiane du bassin versant est supérieure à 1500 m, la fraction neigeuse des précipitations est fonction de l'intervalle de température $[-1; 3^\circ\text{C}]$, déterminé empiriquement par l'USACE (*US Army Corps of Engineers*) en 1956 (Valéry, 2010) :

$$\begin{aligned} \text{Si } T_z < -1^\circ\text{C}, \text{FracNeige}_z &= 1 \\ \text{Si } T_z > 3^\circ\text{C}, \text{FracNeige}_z &= 0 \\ T_z \in [-1; 3]^\circ\text{C}, \text{FracNeige}_z &= 1 - \frac{T_z - (-1)}{3 - (-1)} \end{aligned} \quad \text{Eq. 6}$$

où T_z est la température moyenne journalière de la bande d'altitude z considérée.

Dès lors, il est possible de calculer la quantité de précipitations liquides et solides de chaque bande d'altitude z :

$$\begin{aligned} PG_z &= P_z \times \text{FracNeige}_z \\ PL_z &= P_z - PG_z \end{aligned} \quad \text{Eq. 7}$$

⁷ Nous utilisons ici le terme "solide" pour désigner la précipitation neigeuse uniquement, et non pas l'ensemble des précipitations considérées comme solides, telles que la grêle dont le comportement hydrologique présente des caractéristiques semblables à la pluie.

où PG_z est la hauteur moyenne de précipitation solide (en mm) et PL_z , la hauteur moyenne de précipitation liquide (en mm), sur la bande d'altitude z considérée.

Fonction de production: gestion du stockage de la neige

Dans chaque bande d'altitude, la neige est stockée au sein d'un réservoir conceptuel qui représente le manteau neigeux de la bande d'altitude. Ce réservoir est initialisé à 0 mm lors du lancement de la modélisation et alimenté uniquement par la fraction solide des précipitations.

$$G_z = G'_z + PG_z \quad \text{Eq. 8}$$

où G_z est le stock de neige sur la bande d'altitude (en mm) et G'_z , le stock de neige au pas de temps précédent.

Ce manteau neigeux présente un état thermique qui permet de retarder le déclenchement de la fonte :

$$eT_G = C_{T_G} \times eT_G' + (1 - C_{T_G}) \times T_z \quad \text{Eq. 9}$$

où eT_G est l'état thermique du manteau G , eT_G' , l'état thermique au pas de temps précédent, C_{T_G} , le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau, compris entre 0 et 1, et T_z est la température moyenne de la bande d'altitude considérée. C_{T_G} est le premier paramètre libre du module à caler. Lorsque eT_G est égal à 0, le manteau est dit "mûr" et la fonte peut commencer.

Fonction de transfert: la fonte de la neige

Une fonction de transfert permet de calculer la lame de fonte écoulee, issue du stock de neige, qui va être intégrée au modèle hydrologique, en plus de la fraction liquide des précipitations. Le module commence par calculer une lame de fonte potentielle (quantité maximale de neige susceptible de fondre) selon la méthode degrés-jour, à partir de l'état thermique du manteau et de la température :

$$\begin{aligned} F_{pot_z} &= K_f \times (T_z - T_f) & , \text{ si } eT_G = 0 \text{ et } T_z > T_f \\ & & , \text{ sinon } F_{pot} = 0 \\ F_{pot_z} &= G_z & , \text{ si } F_{pot_z} > G_z \end{aligned} \quad \text{Eq. 10}$$

où T_f représente la température de fonte de la neige fixée à 0°C, F_{pot_z} représente la lame de fonte potentielle (en mm), et K_f , le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau ($\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$). K_f est le second paramètre à caler et est généralement compris entre 2 et 6 $\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$ (même si certaines estimations peuvent atteindre 10 $\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$, selon Hock, 2003, cité dans Valéry, 2010).

La fonte effective (la quantité réelle de neige qui fond) dépend de plusieurs facteurs : la fonte potentielle calculée précédemment, la surface enneigée et la vitesse de fonte minimum quand le stock est très faible. La surface enneigée de la bande d'altitude considérée est déterminée par :

$$\begin{aligned} p_{enneigé_z} &= G_z / G_{seuil} & , \text{ si } G_z < G_{seuil} \\ p_{enneigé_z} &= 1 & \text{ sinon} \end{aligned} \quad \text{Eq. 11}$$

où $p_{enneigé_z}$ est le pourcentage de la surface enneigée sur la zone d'altitude considérée et G_{seuil} le stock de neige à partir duquel toute la zone d'altitude considérée est recouverte de neige. G_{seuil} est fixé empiriquement à 90 % du cumul annuel moyen de neige tombant sur le bassin versant, estimé à partir d'une longue période d'observations (Valéry, 2010).

La fonte effective est calculée par :

$$FONTE_z = [(1 - V_{min}) \times p_{enneigée_z} + V_{min}] \times F_{pot_z} \quad \text{Eq. 12}$$

où $FONTE_z$ est la quantité de neige réellement fondue (en mm) pour la bande d'altitude z considérée et V_{min} , la vitesse de fonte minimum quand le stock est faible (en $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), fixée empiriquement à 0.1.

Cette quantité de neige fondue est ensuite soustraite au réservoir de neige pour l'actualiser :

$$G''_z = G_z - FONTE_z \quad \text{Eq. 13}$$

où G''_z est le niveau du réservoir de stockage après actualisation.

Finalement, la lame d'eau transmise au modèle hydrologique comprend la fraction liquide déterminée précédemment (équation 7), à laquelle est ajoutée la lame de fonte (équation 12) :

$$Lame_eau = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (PL_i + FONTE_i) \quad \text{Eq. 14}$$

Au total, deux paramètres libres sont donc à caler pour le module CemaNeige :

- C_{TG} , le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau, compris entre 0 et 1,
- K_f , le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau (en $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), généralement compris entre 2 et 6 $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

La **figure 10** présente la structure du module CemaNeige pour une bande d'altitude z donnée. L'assemblage des deux modèles (CemaNeige et GRP) a consisté en l'intégration du code FORTRAN du module neige au sein du code du modèle de prévision. Tout comme l'avait fait Valéry, nous avons choisi d'insérer le module neige en amont du modèle hydrologique.

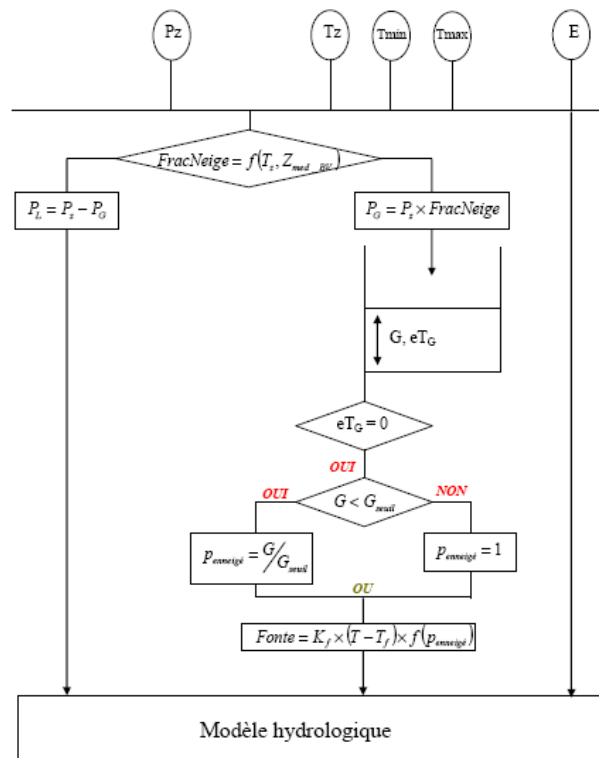


Figure 10 : Structure de CemaNeige pour une bande d'altitude z (tiré de Valéry, 2010)

II.4 Mise en place du modèle et méthode d'évaluation

Nous optons pour une approche simple mais efficace, puisqu'il s'agit d'une approche comparative entre les résultats du modèle de prévision GR3P et ceux de sa version "améliorée" GR5P qui intègre le module neige. La mise en place du modèle comprend son calage et son évaluation.

II.4.1 Procédure générale

Le calage du modèle hydrologique, c'est-à-dire son adaptation au bassin versant précède l'étape d'évaluation. Dans le calage, il s'agit d'optimiser les paramètres libres du modèle en s'appuyant sur les données d'entrée et de sortie connues. La combinaison des données d'entrée et des paramètres libres qui permet de représenter au mieux les débits sur la période considérée est recherchée. Cette combinaison est optimisée sur une fonction objectif qui exprime la distance entre observation et modélisation. Il s'agit d'identifier le jeu de paramètres qui présente la meilleure valeur de fonction objectif. Ici, le calage est fait en optimisant les paramètres sur le critère de persistance (**équation 15**). Trois paramètres sont à caler pour le modèle GR3P sans le module neige et cinq paramètres, pour le modèle GR5P avec module neige intégré.

Ensuite, en modélisation hydrologique, la validation du modèle calé se fait traditionnellement sur une période dite de contrôle. Dans notre cas de prévision hydrologique, nous évaluerons le modèle calé en deux temps :

- dans un premier temps, les performances du modèle sont évaluées en condition de "prévisions parfaites", c'est-à-dire en utilisant la pluie observée comme prévision. Une période de contrôle qui précède le début de notre archive de prévision est utilisée pour cette évaluation. Nous avons choisi de faire le calage sur la période du 01/08/1958 au 31/07/2000 et le contrôle sur la période du 01/08/2000 au 10/03/2005. Les critères utilisés pour cette évaluation en calage/contrôle sont décrits dans le paragraphe II.4.2 ;
- dans un deuxième temps, nous nous focalisons sur l'évaluation de l'archive de prévisions d'ensemble. Dans ce cas, nous effectuons le calage sur la plus longue période disponible, avant le début de la prévision, soit du 01/08/1958 au 10/03/2005 (date de début de l'archive de prévision). Le modèle est alors évalué sur une période de prévision égale à la longueur de l'archive disponible (ici, du 10/03/2005 au 31/07/2008) Les critères utilisés pour cette évaluation en prévision sont décrits dans le paragraphe II.4.3.

II.4.2 Les critères d'évaluation en calage/contrôle

• La Persistance :

Les résultats du modèle sont comparés à un modèle naïf qui considère que le débit prévu au jour i est le même que le dernier débit observé :

$$Persist = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{prévu_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{obs_{i-1}})^2} \right) \quad Persist \in]-\infty; 100] \quad \text{Eq. 15}$$

où, Q_{obs_i} est le débit observé au jour i , $Q_{prévu_i}$, le débit prévu du même jour et $Q_{obs_{i-1}}$ le débit observé du jour précédent le jour i . N est le nombre total de jours de la période d'évaluation.

Le critère vaut 100 pour un modèle parfait, 0 pour un modèle équivalent en qualité au modèle naïf. Il est négatif pour un modèle moins performant que le modèle naïf.

• C2MP :

Le C2MP est la version bornée de la persistance. Il permet d'obtenir une meilleure vision d'ensemble des critères sur un large échantillon de bassins (Mathevet *et al.*, 2006):

$$C2MP = 100 \times \left(\frac{Persist / 100}{2 - Persist / 100} \right) \quad C2MP \in]-100; 100] \quad \text{Eq. 16}$$

II.4.2 Les critères d'évaluation pour la prévision

Plusieurs critères existent dans la littérature pour évaluer les prévisions (Jolliffe et Stephenson, 2003). Nous utilisons ici quelques scores présents dans l'outil de vérification développé par Randrianasolo (2009).

• RMSE (Root Mean Square Error) et ratio-RMSE :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{Q}_{prévis_i} - Q_{obs_i})^2} \quad RMSE \in]0; +\infty] \quad \text{Eq. 17}$$

où, Q_{obs_i} est le débit observé au jour i et $\bar{Q}_{prévis_i}$ est la moyenne des débits prévus des 11 membres de la prévision d'ensemble. N est le nombre total de jours de la période d'évaluation.⁸

Pour s'affranchir de l'effet de taille des bassins et travailler sur des valeurs adimensionnelles qui permettent la comparaison des bassins entre eux, le ratio des RMSE par rapport aux valeurs moyennes observées est évalué :

$$ratio_RMSE = \frac{RMSE}{obs} \quad \text{Eq. 18}$$

où, \overline{obs} est la moyenne de la variable observée (précipitation, température ou débit) pendant la période d'évaluation.

• CSI (Critical Success Index) :

Le score CSI dérive du tableau de contingence. Ce tableau permet d'étudier l'association de deux variables et d'en déduire des probabilités conjointes et conditionnelles ainsi que de visualiser quel type d'erreur a été commise. Une bonne prévision devrait logiquement ne contenir que des succès et rejets corrects.

Tableau 3 : Tableau de contingence en prévision

		Evènement observé		Total
		OUI	NON	
Evènement prévu	OUI	Succès	Fausse alerte	Prévu
	NON	Manqué	Rejets corrects	Non prévu
Total		Observé	Non observé	Total

Les évènements observés sont définis à partir de seuils préalablement choisis. On va s'intéresser aux évènements qui dépassent les seuils :

Q_{ref1} : le quantile 50% des débits observés (Q50)

Q_{ref2} : le quantile 90% des débits observés (Q90)

Pour les évènements prévus, si 80% des membres de la prévision atteignent les seuils de débits, alors l'évènement est considéré comme un évènement prévu, sinon, il est non prévu. Nous n'utilisons que ce seuil de membre. En effet, Randrianasolo (2009) a montré que les résultats ne sont pas sensibles à la variation de ce pourcentage, à cause de la faible dispersion des membres de la prévision d'ensemble.

⁸ Nous utilisons également le RMSE et son ratio en calage/contrôle : la moyenne des débits prévus des 11 membres de la prévision d'ensemble est alors remplacé par le seul débit prévu déterministe disponible en "prévision parfaite".

Le score CSI mesure la part des succès par rapport au total de succès et événements "ratés" (prévus et non-observés, observés et non-prévus).

$$CSI = \frac{\text{succès}}{\text{succès} + \text{événements manqués} + \text{fausses alertes}} \quad \text{Eq. 19}$$

• **Le Brier Score (BS) et le Brier Skill Score (BSS) :**

Ce sont des critères couramment utilisés pour évaluer la prévision d'ensemble. Ils qualifient le système probabiliste par rapport à un dépassement de seuil. Le Brier Skill Score associé compare le Brier Score du système qui est évalué au Brier Score d'un système de référence.

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2 \quad BS \in [0;1] \quad \text{Eq. 20}$$

où N est le nombre de prévisions sur la période de vérification, et, pour chaque jour de prévision i , y_i est la probabilité de prévision de l'évènement et o_i est la probabilité d'observation. o_i a une valeur égale à 1 si l'évènement s'est produit et 0 sinon. y_i est donnée par le ratio entre le nombre de membres prévoyant l'évènement et le nombre total de membres de la prévision d'ensemble.

Les mêmes seuils de débits que pour le tableau de contingence sont utilisés pour définir les évènements (Q50 et Q90). Un score $BS = 0$ équivaut à une prévision déterministe parfaite (tous les membres dépassent le seuil pour un évènement observé ou ne le dépassent pas pour un évènement non-observé) ; un critère de 1 équivaut à une mauvaise prévision.

Afin de comparer nos deux systèmes de prévisions (GR5P avec neige et GR3P sans neige), le score de performance BSS va être utilisé. On considère le BS donné par la prévision de GR3P comme référence :

$$BSS = 1 - \frac{BS_{GR5P}}{BS_{GR3P}} \quad \text{Eq. 21}$$

Un BSS de 1 indique que le système de prévision avec GR5P fournit un $BS = 0$ (score parfait). Un BSS de 0 indique que le système GR5P présente une performance égale au système GR3P. Le BSS est négatif pour un système GR5P plus mauvais que le système de référence GR3P.

• **Le Discrete Ranked Probability Score (DRPS ou RPS) et le Discrete Ranked Probability Skill Score (RPSS) :**

Le score de probabilité ordonnée (RPS) est analogue au BS mais s'applique à des catégories multiples et non pas à un seul seuil de dépassement. C'est une mesure de "distance" entre les distributions de probabilités cumulatives des prévisions et des observations. Il est alors sensible à la distance, c'est-à-dire qu'il donne un plus mauvais critère de performance aux prévisions les plus éloignées de l'observation.

Pour le calcul du RPS, 10 classes ont été définies, correspondant aux quantiles Q10, Q20, ..., Q90. Pour chaque prévision d'ensemble, une probabilité de prévision (y_j) est associée à chaque catégorie j (y_j est le rapport entre le nombre de membres dans la catégorie et le nombre total de membres). Un vecteur pour l'observation est également construit : on attribue la valeur de 1 à la catégorie dans laquelle l'évènement est observé et 0 aux autres catégories. Les sommes cumulées pour la prévision et l'observation sont ensuite calculées :

$$Y_m = \sum_{j=1}^m y_j$$

$$O_m = \sum_{j=1}^m o_j$$

$m = 1, \dots, J$

où Y_m est la somme cumulée des probabilités de prévision pour les catégories $j \leq m$, et O_m la somme cumulée des probabilités d'observation pour les catégories $j \leq m$.

Le RPS est alors défini comme la différence des écarts quadratiques des différentes composantes de prévision cumulée et d'observation cumulée :

$$RPS = \frac{1}{J-1} \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2$$

Eq. 22

L'équation ci-dessus ne donne que le RPS d'un jour de prévision. Pour un nombre N de jours, le RPS est la moyenne des RPS individuels :

$$\overline{RPS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RPS_i$$

Eq. 23

Le modèle est performant pour un RPS = 0 et mauvais pour un RPS = 1

De même que pour le BS, on définit un score de performance RPSS pour comparer deux systèmes de prévision. Ici, également, nous comparons le système de prévision GR5P au système de référence GR3P :

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}_{GR5P}}{\overline{RPS}_{GR3P}}$$

Eq. 24

RPSS = 1 pour un système de prévision GR5P qui fournit le score RPS parfait (= 0). Un score RPSS = 0 indique que le système GR5P présente une performance égale au système GR3P. Le RPSS est négatif pour un système GR5P plus mauvais que le système de référence GR3P.

Troisième partie : Résultats et interprétation

Dans un premier temps, nous nous attacherons à présenter les tests de sensibilité effectués pour la configuration et paramétrisation du modèle GR5P. Dans un second temps, nous présenterons les résultats de l'apport du module neige selon les deux perspectives d'évaluation présentées précédemment : tout d'abord, en situation "calage-contrôle", pour laquelle les précipitations observées sont utilisées en entrée au modèle dans un cas de "prévisions parfaites", puis, en évaluant la qualité des prévisions d'ensemble de débits basées sur les scénarios de la prévision météorologique PEARP.

III.1 Configuration et paramétrisation de GR5P : analyses de sensibilité

Le but ici est de vérifier qu'une faible variation des paramètres fixes du modèle n'engendre pas des résultats trop différents, et d'optimiser les paramètres du modèle le cas échéant. Pour tous les tests, l'évaluation se fait en calage/contrôle et le critère utilisé est le C2MP évalué en contrôle. Les résultats sont présentés par des statistiques évaluées considérant l'ensemble des bassins versants présents dans chaque groupe de régime hydrologique défini et affichées sous forme de "boîtes à moustaches" : le trait à l'intérieur de la boîte représente la médiane des valeurs, les limites inférieures et supérieures représentent, respectivement, les quantiles 25 et 75, et les limites inférieures et supérieures des moustaches représentent, respectivement, les quantiles 10 et 90. Les points en dehors des moustaches représentent les valeurs extrêmes.

III.1.1 Le paramètre B : la capacité du réservoir de production

Pour une même configuration des paramètres du modèle GR5P, quatre valeurs de B ont été testées : 200, 275, 350 (valeur initiale proposée dans GR3P) et 400 mm. La **figure 11** montre très peu d'évolution du critère de performance en fonction de la capacité du réservoir de production. Globalement, on observe une légère amélioration des performances avec l'augmentation de B, excepté pour les régimes de type pluvial, où on observe une légère dégradation des performances pour les quantiles supérieurs. Il semble plus prudent de favoriser l'amélioration des performances lorsque celles-ci sont plus faibles, soit pour les quantiles inférieurs ou pour les régimes à dominante nivale ou de transition. Ainsi, une valeur de B à 350 ou 400 mm semble la meilleure option. Nous choisissons de garder la valeur initiale de GR3P (B = 350 mm), compte tenu de la quasi-similarité des boîtes pour B = 350 ou 400.

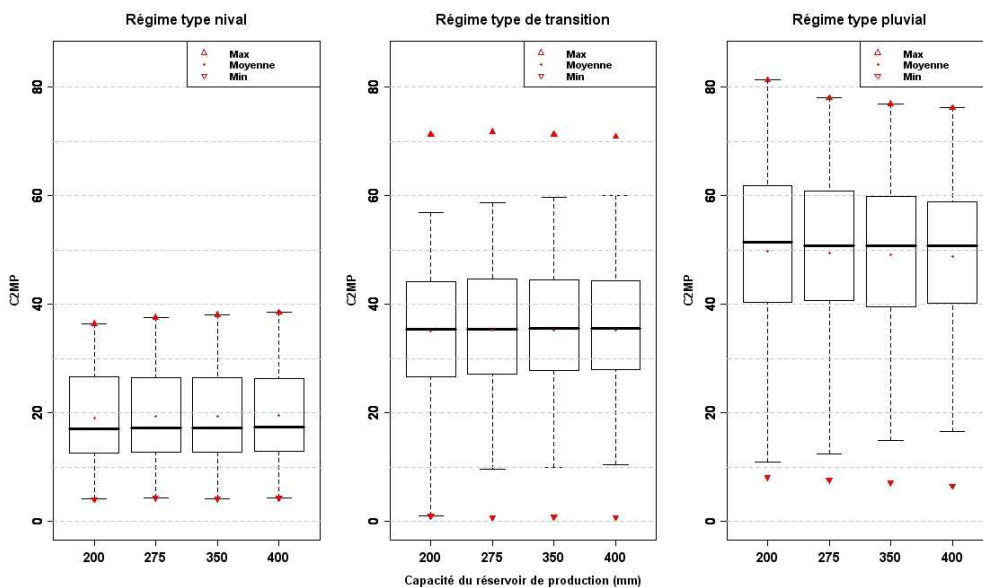


Figure 11 : Distribution des performances en C2MP en fonction de la capacité du réservoir de production

III.1.2 Impacts de l'initialisation des paramètres libres de Cemaneige

Nous avons testé ici les valeurs de l'initialisation des paramètres libres de Cemaneige : le facteur de fonte K_f et le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau CT_g . Les valeurs testées sont celles préconisées par Valéry (2010) pour l'association de Cemaneige et GR4J (indiqué ici, "modèle") ($K_f = 2.72 \text{ mm.j}^{-1}$, $CT_g = 0.39$), ainsi que les valeurs médianes de la distribution des valeurs calées pour ces paramètres (indiqué ici, "médiane") ($K_f = 2.45 \text{ mm.j}^{-1}$, $CT_g = 0.39$). La **figure 12** montre également peu d'évolution du critère de performance avec la variation des valeurs d'initialisation des paramètres libres du modèle. Les régimes de transition semblent être les plus sensibles : notamment, on observe une diminution des valeurs extrêmes (aplatissement du graphique) quand on initialise le calage avec les valeurs indiquées par l'option *modèle*. Pour les régimes de type pluvial, on observe le contraire, à savoir une augmentation des valeurs extrêmes pour l'option *modèle*, mais moins prononcée. Nous retenons donc les valeurs données par l'option *modèle* pour l'initialisation des paramètres libres de Cemaneige lors du calage.

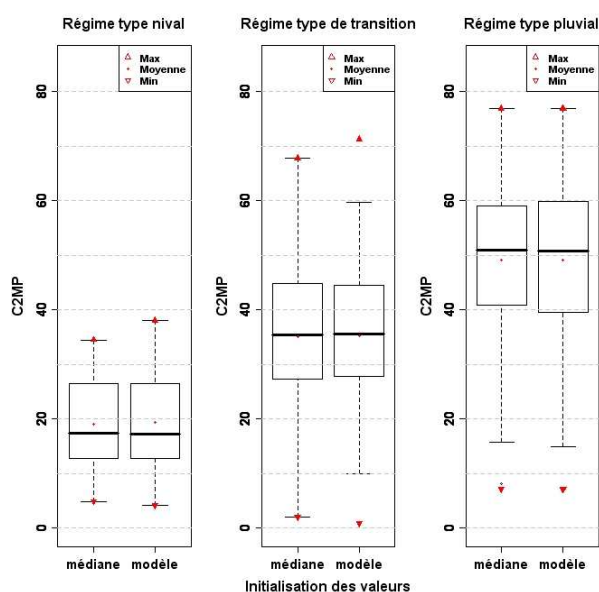


Figure 12 : Distribution des performances en C2MP en fonction de l'initialisation des paramètres libres K_f et CT_g

III.1.3 Utilisation d'un gradient altitudinal fixe ou variable

Nous avons testé l'utilisation d'un gradient altitudinal fixe toute l'année ou variable (gradient altitudinal journalier). Le gradient fixe est celui optimisé par Valéry (2010), soit $-0.54 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Les gradients variables sont compris entre -0.428 et $-0.602 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ et ont également été optimisés par Valéry (2010). La **figure 13** montre que la sensibilité au changement de gradient de température est également très faible. Le gradient fixe donne des résultats légèrement meilleurs pour les bassins appartenant aux régimes de type nival et de transition. Pour les régimes de type pluvial, les quantiles médians sont aussi très proches, que ce soit un gradient fixe ou variable, même si l'intervalle inter-quantile 10% - 90% est plus resserré quand le gradient variable est utilisé. Dans le cadre de cette étude, il semble qu'améliorer les faibles C2MP des régimes de type nival et de transition soit plus avantageux que d'améliorer des C2MP plus forts des régimes de type pluvial : d'après les résultats, nous optons donc pour un gradient altitudinal constant.

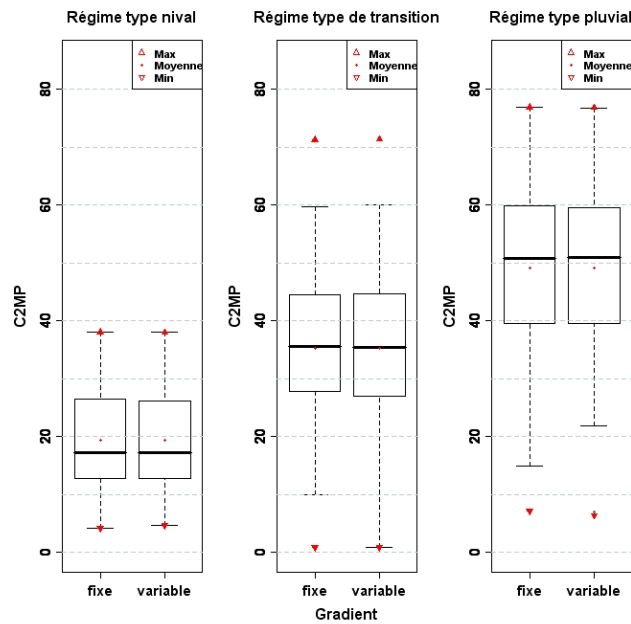


Figure 13 : Distribution des performances en C2MP en fonction de l'utilisation d'un gradient fixe ou variable

III.1.4 Sensibilité des performances et des paramètres à l'échéance de prévision

La figure 14 présente l'évolution en contrôle du critère de performance C2MP avec l'échéance de prévision. On observe une amélioration du critère de performance avec l'échéance (ce qui est normal puisqu'il est plus facile de prévoir mieux que le dernier débit observé à des échéances lointaines). On remarque des variations plus sensibles du C2MP de l'échéance 1 à l'échéance 2 (+ 15 points en valeur médiane) alors que les performances entre l'échéance 2 et 5 varient progressivement et assez peu (+7 points en valeur médiane).

La figure 15 présente l'évolution des valeurs des paramètres libres calés avec l'échéance de prévision pour trois exemples de bassins aux performances variables. Ici l'optimisation des paramètres libres se fait sur chaque échéance de prévision. On observe une bonne stabilité des valeurs des paramètres du modèle avec l'échéance, avec assez peu de variation, quelques soient les performances initiales du modèle.

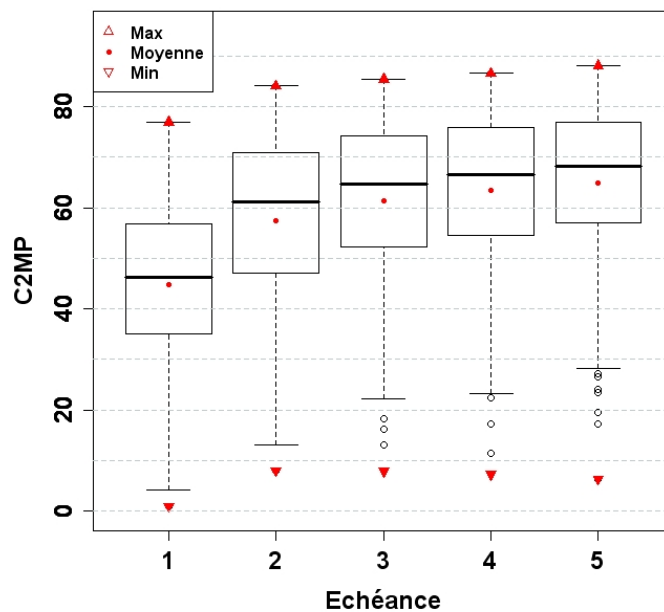


Figure 14 : Evolution des performances en C2MP avec l'échéance de prévision (cas de "prévisions parfaites")

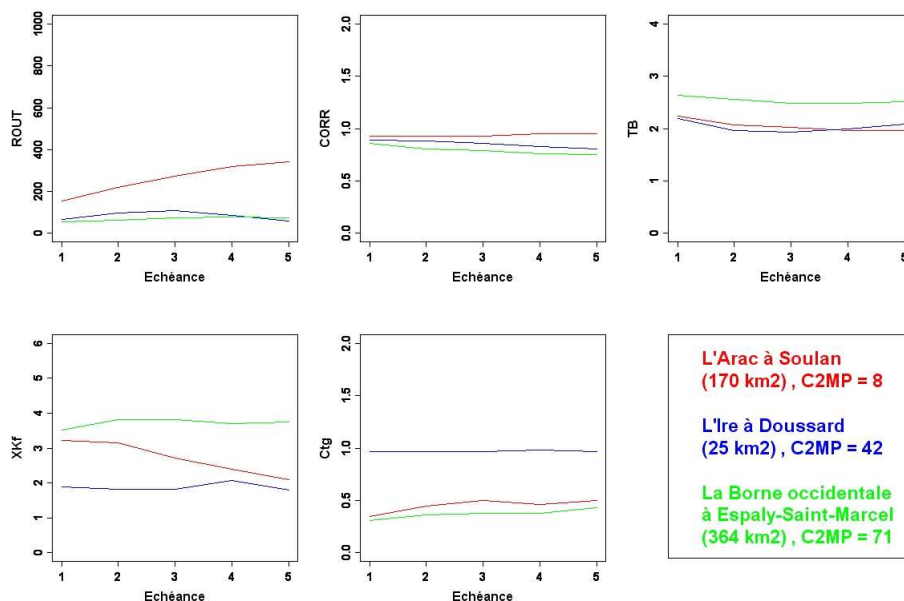


Figure 15 : Exemple d'évolution des valeurs des paramètres calés avec l'échéance de prévision (cas de "prévisions parfaites") pour trois bassins aux performances différentes

III.1.5 Paramètres libres ou fixes pour Cemaneige?

Nous tentons ici, comme l'avait fait Valéry (2010) pour l'introduction du modèle CemaNeige dans GR4J, de réduire le degré de liberté du modèle en fixant les paramètres libres du module neige. La **figure 16** montre globalement que l'utilisation de paramètres fixes dans le module neige ne change pas sensiblement les performances pour les régimes des types pluvial et de transition. Par contre, il dégrade les performances pour les régimes à dominante nivale : notamment pour les quantiles Q90, Q75 et Q25. Puisque l'intérêt du module neige s'applique surtout pour les bassins plus influencés par la neige, nous choisissons donc de garder les paramètres du module neige libres. Néanmoins, on notera que les performances du modèle GR5P avec paramètres fixes pour le module neige sont nettement supérieures aux performances de GR3P. Comme l'avait souligné Valéry (2010), l'intérêt d'avoir un module neige sans paramètres libres peut être utile pour des études sur des bassins versants non jaugés pour lesquels il est difficile, voire impossible, de déterminer les valeurs des paramètres du modèle hydrologique par une procédure de calage.

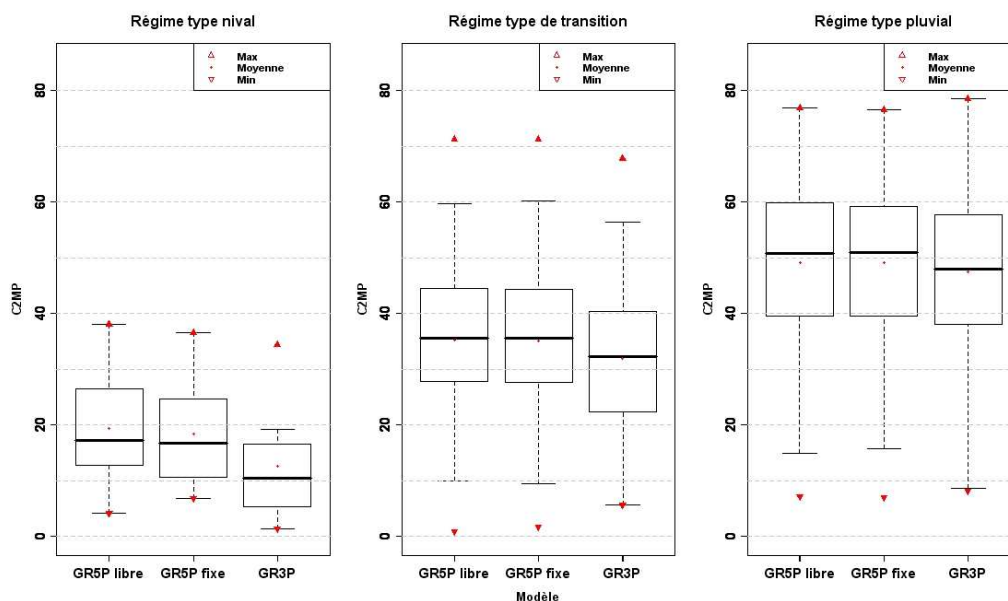


Figure 16 : Performance des modèles GR5P avec paramètres libres et fixes pour Cemaneige et comparaison avec les performances de GR3P

III.1.6 Configuration finale du modèle GR5P

En conclusion de l'analyse de sensibilité du modèle GR5P, nous retiendrons donc une capacité du réservoir de production fixée à 350 mm, une initialisation des paramètres libres de Cemaneige telle que préconisée par Valéry (2010), ainsi que l'utilisation d'un gradient altitudinal constant, contrairement à ce qu'avait démontré et utilisé Valéry pour le modèle de simulation. Cette différence peut s'expliquer par l'utilisation d'un modèle sensiblement différent, mais également par l'utilisation d'une base de données et d'un échantillon de bassins versants différents. La tentative de réduction des paramètres libres du modèle s'est avérée infructueuse, mais offre de bonnes perspectives pour les bassins non jaugés. Nous garderons donc les deux paramètres libres du module Cemaneige à caler.

Par ailleurs, du fait que nous ne disposons que des données de températures moyennes journalières pour le calage du modèle, la fonction de détermination de la nature des précipitations qui utilise les T°C min et max pour les bassins dont l'altitude médiane est inférieure à 1500 m ne sera pas utilisée. Nous nous contenterons de la fonction de type USACE qui utilise les températures moyennes pour tous les bassins de notre échantillon. Bien que certains modules neige n'utilisent que cette fonction (MOHYSE, Fortin et Turcotte 2007, NAM, DHI 2009, SIMHYD, Chiew *et al.* 2002, cités dans Valéry 2010), Valéry (2010) a montré que les performances du modèle GR4J étaient moindres quand les températures moyennes étaient utilisées pour les bassins d'altitude médiane inférieure à 1500 m. Nous pouvons penser que les performances du modèle GR5P ici présentées seront peut-être sous-estimées de ce fait pour ce type de bassin.

La **figure 17** présente les cartes des valeurs calées de chaque paramètre libre du modèle GR5P, en calage sur toute la période de données disponibles et pour une optimisation de la performance à la première échéance de prévision.

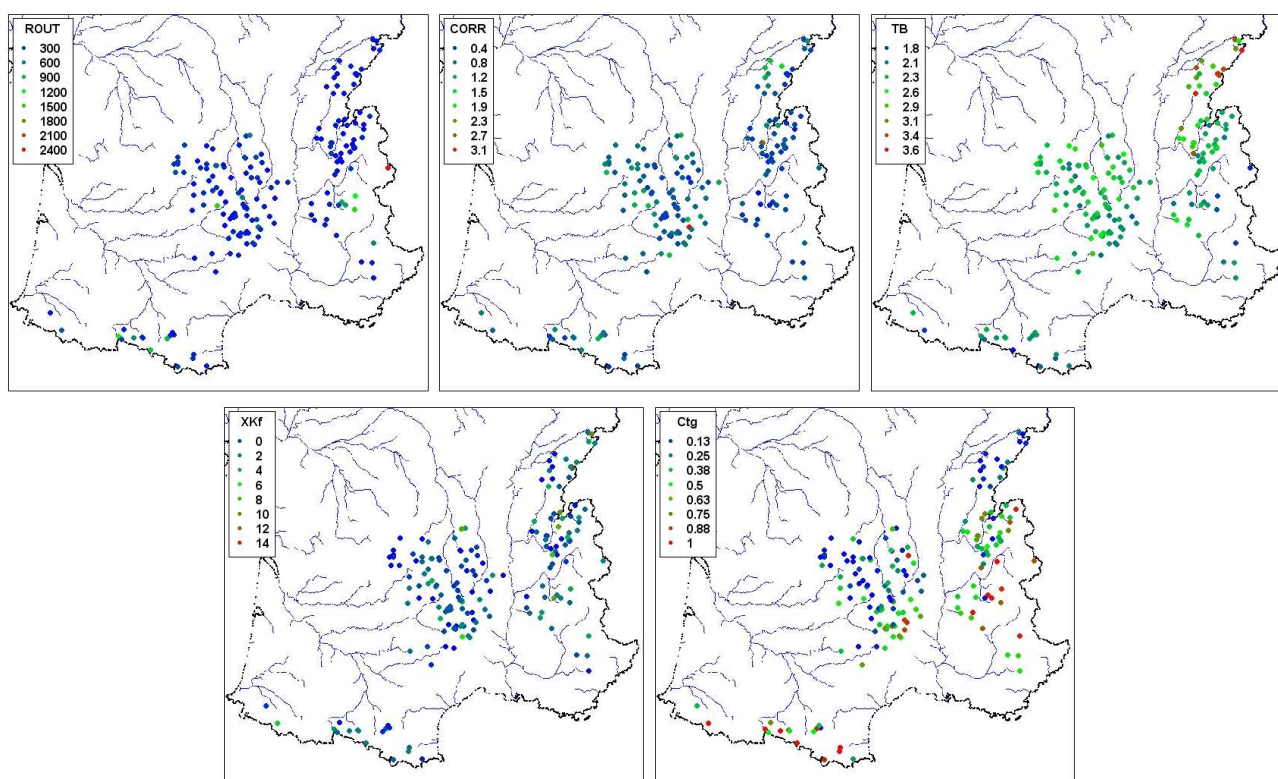


Figure 17 : Cartes des valeurs des paramètres calés à la première échéance de prévision

III.2 Evaluation de l'apport du module neige

Cette partie a pour objectif de comparer le "nouveau" modèle GR5P au modèle GR3P, afin d'évaluer l'apport du module neige au sein du modèle de prévision. Dans un premier temps, nous

évaluons les performances des deux modèles en contrôle (prévisions parfaites), en fonction de l'échéance de prévision et des régimes hydrologiques précédemment établis. L'utilisation de prévisions parfaites permet d'observer les erreurs uniquement liées au modèle puisque l'on écarte les erreurs liées à la prévision des données d'entrée. Dans un second temps, nous suivons la même démarche mais pour la prévision d'ensemble cette fois-ci.

Pour une meilleure compréhension des résultats, il paraît important d'apporter quelques précisions sur le modèle GR5P. Lorsque la température est supérieure à 3°C (température au dessus de laquelle le module neige considère toutes les précipitations comme liquides), et que le stock de neige est nul, GR5P se comporte exactement de la même façon que GR3P. Dans ce cas, les débits prévus seront exactement les mêmes.

III.2.1 Performances en contrôle

- **Evaluation pour la première échéance de prévision (j+1) :**

La **figure 18** présente le corrélogramme des performances en C2MP pour GR5P et GR3P (à gauche) et la carte des améliorations et dégradations des performances en fonction des régimes hydrologiques (à droite). On observe clairement une amélioration du critère de performance avec GR5P (en vert : $C2MP_{GR5P} > C2MP_{GR3P}$). Quantitativement, 70.5% des bassins (124 bassins) présentent une amélioration du critère de performance contre 27.3% (48 bassins) qui présentent une dégradation. 2.2% des bassins (4 bassins) présentent des performances équivalentes.

En considérant une amélioration ou une dégradation significative à partir de 1 point de performance, 64.2% des bassins (113 bassins) améliorent significativement leur critère et 13.1% des bassins (23 bassins) le dégradent. La carte présentée permet d'observer plus précisément ces gains et pertes de performance. On remarque une amélioration pour 82 des 130 bassins (63.1%) à dominante pluviale, pour 35 des 38 bassins (92.1%) de transition, et pour tous les bassins à dominante nivale. On remarque aussi que la majorité des pertes de performances est affectée aux bassins du Massif Central, néanmoins cela semble normal car cette zone rassemble une grande majorité de bassins à dominante pluviale.

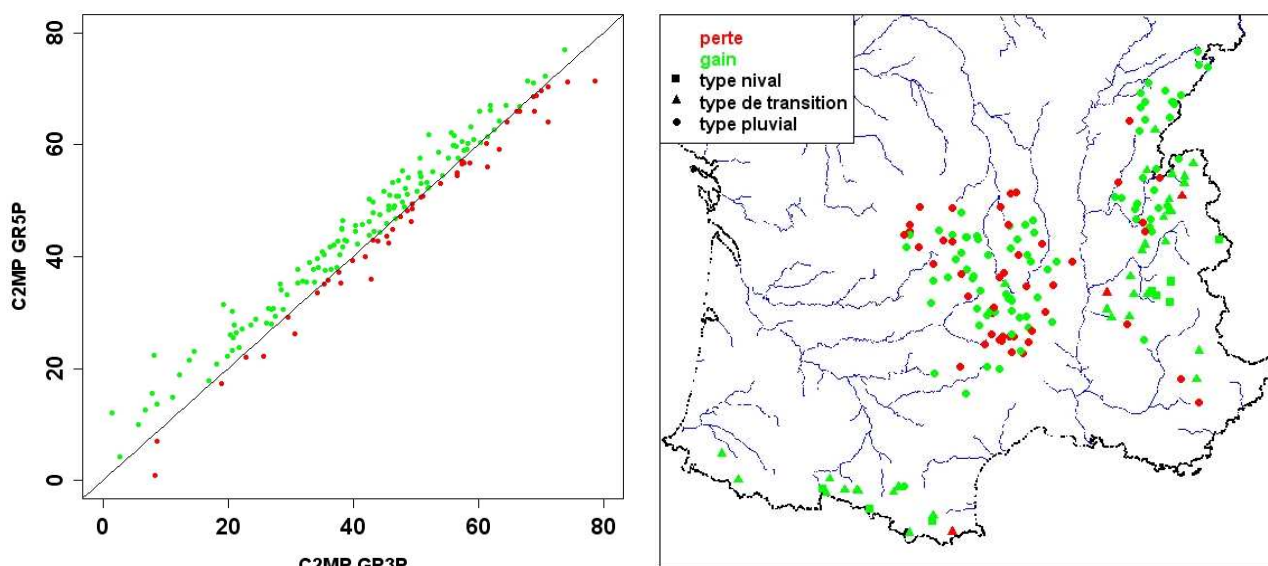


Figure 18 : Corrélogramme des performances de GR5P en fonction de GR3P (à gauche) et carte des améliorations et dégradation des performances en fonction des régimes hydrologiques (à droite)

La **figure 19** présente la distribution statistique des performances de GR5P et GR3P en fonction des régimes hydrologiques et pour les cas où on considère tous les débits dans le calcul de C2MP (à gauche) ou seulement pour les débits supérieurs au débit moyen (à droite).

On remarque que les performances sont nettement améliorées avec l'introduction d'un module neige dans le modèle, quelque soit le type de régime. Par ailleurs, plus le régime est influencé par la

neige, plus le gain de performance semble important : pour le cas où tous les débits sont utilisés dans le calcul du C2MP, on retrouve 6.1 points de gain en C2MP, en moyenne, pour les régimes à dominante nivale, 3.4 points pour les régimes de transition, et 1.7 points pour les régimes à dominante pluviale (2.3 points pour l'ensemble des bassins). Quand seuls les débits supérieurs au débit moyen sont utilisés pour évaluer la performance, les mêmes tendances sont observées, et les gains sont encore plus importants : 8.1 points de gain en moyenne pour les régimes à dominante nivale, 4.4 points pour les régimes de transition, 1.8 points pour les régimes à dominante pluviale (2.6 points pour l'ensemble des bassins).

Le gain plus petit de performance en régime de type pluvial peut être lié au fait que les critères sont calculés sur la même période pour tous les bassins (et donc régimes) et que les valeurs de critères pour GR5P et GR3P seront les mêmes lorsque le module neige n'aura pas d'effet (quand $T^{\circ}\text{C} > 3^{\circ}\text{C}$ et le stock de neige est nul). Ainsi, pour des régimes de type pluvial, le module neige sera moins souvent sollicité que pour les régimes de type nivale : les différences de performances entre les deux modèles en seront amoindries.

A noter que les performances calculées pour les débits supérieurs au débit moyen sont plus élevées que pour celles calculées pour tous les débits puisqu'il est plus facile de battre le modèle naïf de persistance dans ce cas de hautes eaux.

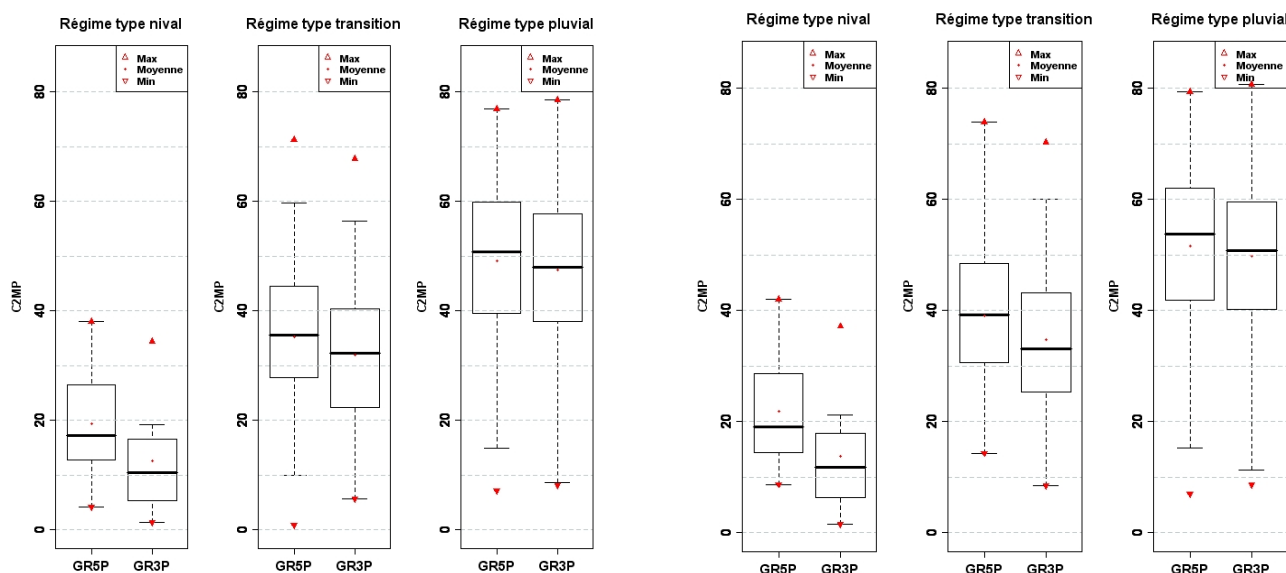


Figure 19 : Performances des modèles GR5P et GR3P en fonction des régimes hydrologiques pour les cas où l'on considère tous les débits dans le calcul de C2MP (à gauche) et seulement les débits supérieurs au débit moyen (à droite)

Nous tentons de distinguer les performances du modèle selon une saisonnalité où les performances sont calculées sur une période où le stockage serait dominant (septembre à février) et sur une autre où la fonte serait dominante (mars à août). La **figure 20** montre que les gains de performance sont supérieurs pour la période de stockage, et pour les régimes influencés par la neige (+ 2.4 points de gains par rapport à la période de fonte en moyenne pour les régimes à dominante nivale, + 0.1 point pour les régimes de transition, - 0.2 point pour les régimes à dominante pluviale, avec aucune amélioration en moyenne pour l'ensemble des bassins).

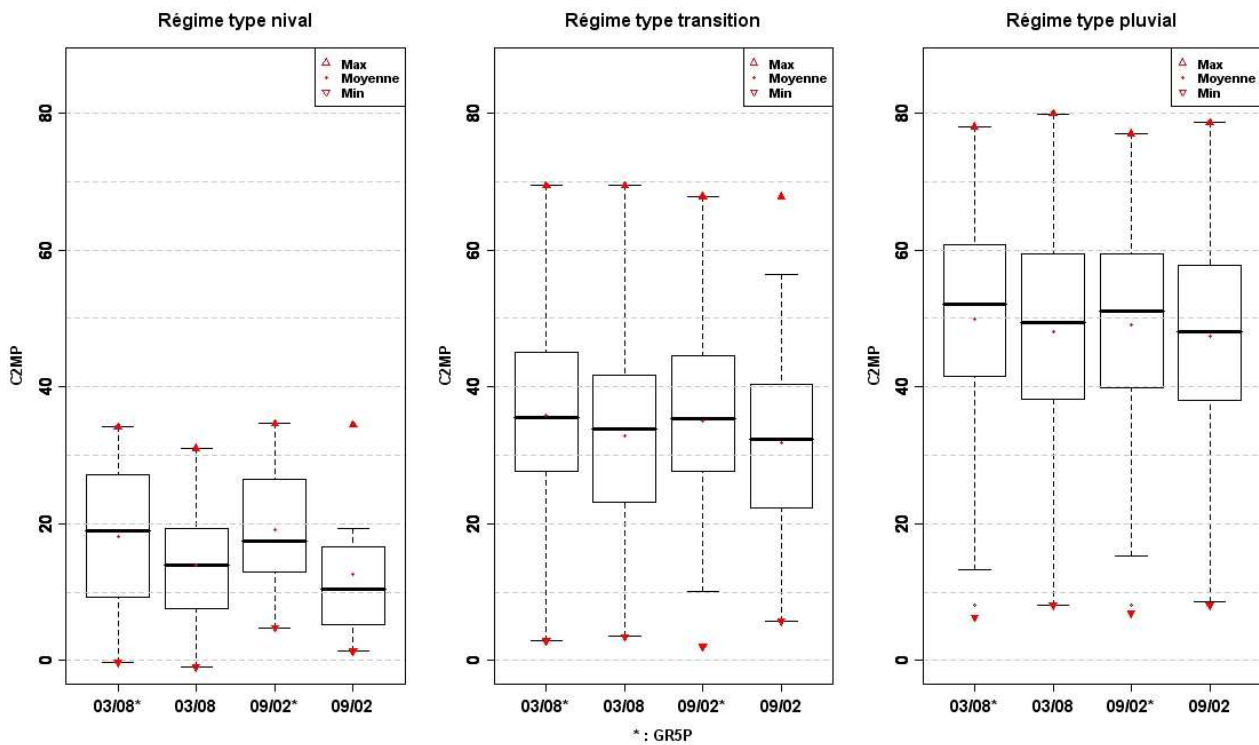


Figure 20 : Performances des modèles GR5P et GR3P en fonction des régimes hydrologiques pour les mois de mars à août (03/08) et septembre à février (09/02)

- **Evolution des performances avec l'échéance :**

On se propose d'observer quels peuvent être les gains/pertes de performance avec l'augmentation de l'échéance de prévision. La **figure 21** présente la distribution des gains de performance en RMSE avec l'échéance de prévision et pour chaque type de régime hydrologique (nous représentons la différence donnée par $RMSE_{GR3P} - RMSE_{GR5P}$, avec donc gain pour GR5P – ou apport du module neige – si $gain\ RMSE > 0$, et perte si $gain\ RMSE < 0$). Pour les régimes à dominante nivale, on observe une tendance à l'augmentation du gain (augmentation générale des quantiles) : plus l'échéance de prévision augmente, plus l'apport du module neige sera important, et d'autant plus que le gain à la 1^{ère} échéance est important. En général, on observe également une augmentation plus importante du gain pour le quantile 90% que pour le quantile 10%. Pour les régimes de transition, on observe cette même tendance avec cependant une stabilisation (voire une baisse) du gain pour le quantile 10%. Pour les bassins à dominante pluviale, le gain est plus stable avec l'échéance de prévision, même si l'on observe une tendance à l'augmentation des gains et des pertes (élargissement des boîtes à moustaches).

Ainsi, on voit nettement que plus les régimes hydrologiques sont influencés par la neige, plus l'apport du module neige augmente avec l'échéance de prévision. Ceci peut s'expliquer par la mise à jour du débit dans le modèle. En effet, celle-ci n'intervient qu'à l'instant de prévision, et corrige les débits sortants du réservoir de routage pour qu'ils soient égaux aux derniers débits observés. Ainsi, lorsque le modèle calcule une prévision à $j+1$, la divergence entre les deux débits prévus (avec GR3P et GR5P) sera moindre et donc l'intérêt du module neige va s'en trouver réduit. Pour les autres échéances de prévision, aucune mise à jour du débit n'est effectuée, le modèle partira donc du débit prévu à $j+1$ pour fournir une prévision à $j+2$. La divergence entre les débits prévus à $j+2$ risque d'être plus importante du fait de la différence entre les deux débits à $j+1$ et de l'apport fourni par l'amélioration de la modélisation. Ce phénomène se répète avec les autres échéances de prévision : on a donc une différence entre les débits de GR3P et GR5P qui peut devenir de plus en plus importante avec l'échéance de prévision.

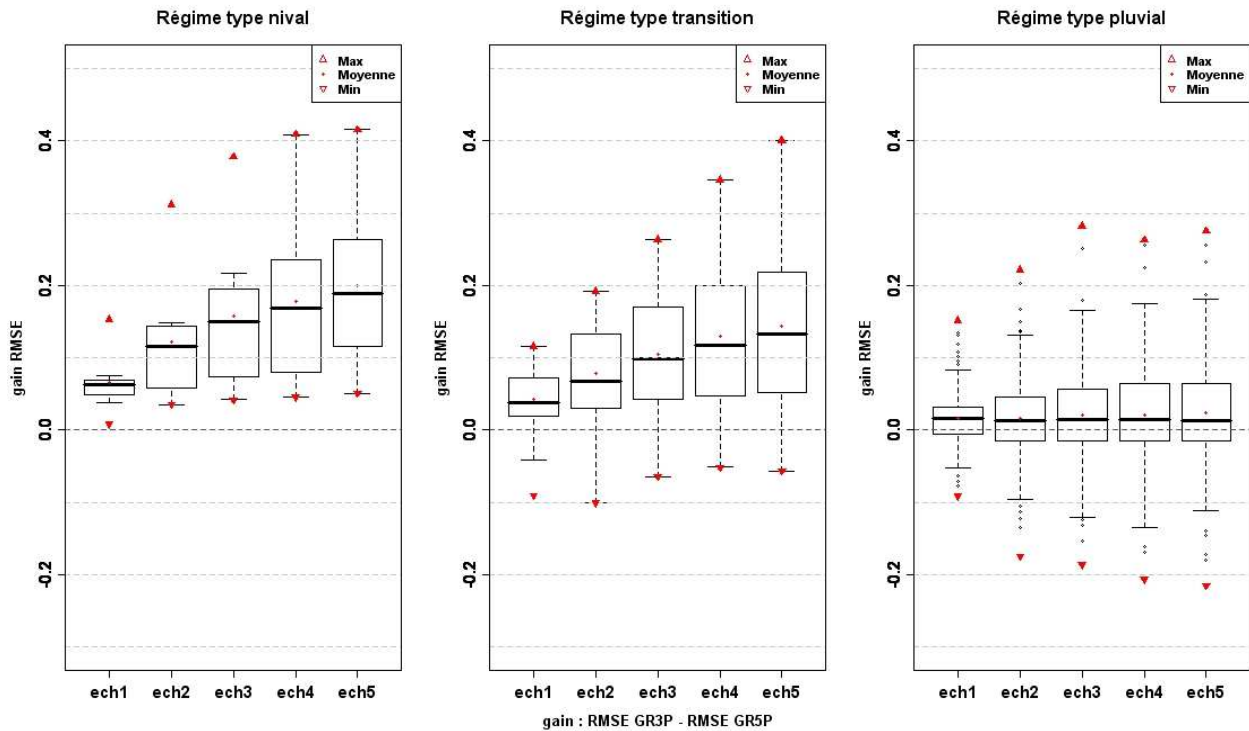


Figure 21 : Evolution des gains de performance avec l'échéance de prévision (cas de "prévisions parfaites") en fonction des régimes hydrologiques

Pour résumer, l'évaluation du modèle GR5P en condition de prévisions parfaites, où les précipitations observées sont considérées en prévision, a montré que :

- les performances du modèle sont améliorées pour une majorité de bassins (70,5 %), même pour les bassins de type pluvial (64.5 % de ces bassins) ;
- les performances sont d'autant plus améliorées que le régime hydrologique des bassins est influencé par la neige ;
- les gains de performance de GR5P par rapport à GR3P sont plus importants quand les critères sont évalués sur les hautes eaux (débits supérieurs à la moyenne) et pour la période de stockage (septembre à février) ;
- les gains de performance augmentent avec l'échéance de prévision et d'autant plus que les régimes sont influencés par la neige.

III.2.2 Evaluation de la qualité des prévisions

Compte tenu du nombre important de résultats dont nous disposons, nous n'en présenterons qu'une partie ici, représentative des principaux résultats obtenus lors de l'évaluation des prévisions d'ensemble.

- **Les entrées prévues : précipitations et températures**

Un premier travail a consisté à avoir un aperçu général sur les prévisions de pluies, de températures et de débits. Cela permet d'une part de vérifier que le code du modèle fonctionne correctement, et d'autre part d'opérer un premier dépouillement visuel afin d'identifier d'éventuelles sources d'erreur potentielles.

La **figure 22** compare les données prévues pour les 11 membres de l'ensemble aux données observées. Les précipitations, températures et débits de la Loire à Usclades-et-Rieutord (62 km²) sont présentés pour les mois d'avril et d'octobre 2005, afin de refléter les variations saisonnières. Pour les débits prévus, nous présentons les prévisions des deux modèles (GR5P et GR3P). On observe bien ici la dispersion des valeurs de précipitations et températures prévues de chaque membre de la prévision d'ensemble : pour l'épisode pluvieux le plus important du mois d'avril où les précipitations observées atteignent environ 48 mm, les prévisions oscillent entre 27 et 73 mm soit

une amplitude de 46 mm. L'amplitude des températures prévues pour une journée peut atteindre quant à elle 5 ou 6 °C.

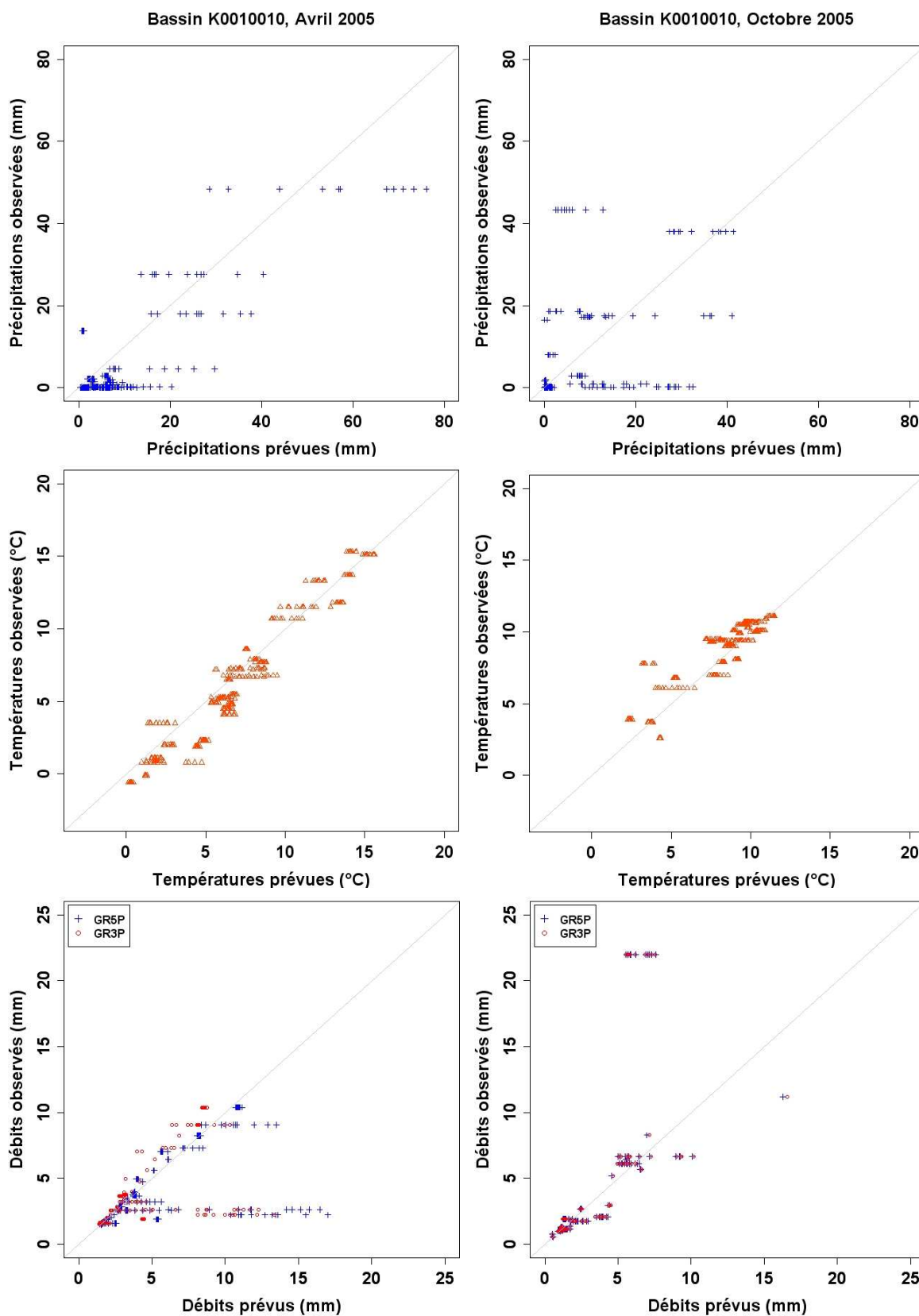


Figure 22 : Données observées et prévisions d'ensemble (11 membres) pour la Loire à Usclades-et-Rieutord (Ardèche, 62 km²) en Avril (gauche) et Octobre (droite) : précipitations (haut), températures (milieu) et débits (bas) issus des modèles GR3P (cercles rouges) et GR5P (croix bleues)

Les précipitations semblent moins refléter les observations que les températures : certains épisodes pluvieux semblent assez mal prévus par l'ensemble des membres, c'est le cas pour l'épisode le plus important du mois d'octobre où les observations indiquent 44 mm de pluie alors que le membre qui prévoit le plus de pluie ne dépasse pas 16 mm. Globalement, les températures suivent plus la bissectrice sur le graphique. Même si le bassin présenté ne couvre que l'équivalent d'une maille SAFRAN (8*8 km), les résultats sur d'autres bassins (> 1000 km²) présentent les mêmes conclusions.

Pour les débits, la dispersion des membres semble un peu moins importante que celles des précipitations. Attention toutefois puisque nous ne présentons ici que deux mois particuliers pour un bassin particulier. Il est intéressant de remarquer que pour le mois d'avril, GR5P a tendance à prévoir plus que GR3P (le dépouillement des graphiques confirme globalement cette légère tendance), mais aucune tendance à la sur-prévision ou à la sous-prévision par rapport aux observations n'est discernable : certains événements semblent prévoir plus que le débit observé alors que d'autres prévoient moins. Pour le mois d'octobre, le comportement des deux modèles est très similaire.

La **figure 23** présente les hydrogrammes de débits observés et prévus pour GR5P (en haut) et GR3P (en bas) accompagnés des températures (en rouge) et précipitations observées (bleu : pluie, cyan : neige) issues de notre base de données. Nous avons choisi le bassin de la Dore à Dorat (Puy de Dôme, 1523 km²), bassin pour lequel Randrianasolo avait signalé des problèmes de prévision liés à la neige.

On voit très bien sur ce graphique l'apport du module neige dans le modèle de prévision : pour le mois de mars, le pic de crue dû à la fonte est beaucoup mieux modélisé avec GR5P (à ce moment, le stock de neige contient encore une partie des précipitations neigeuses accumulées pendant les mois précédents et la fonte se déclenche aux alentours du 13-14 mars). En revanche, en avril, GR5P et GR3P fournissent sensiblement les mêmes débits. Pourtant, les températures sont parfois inférieures à 3°C : le module neige va donc "produire" de la neige (les observations le montre d'ailleurs). Néanmoins aucun débit lié à la fonte n'est visible. Il est probable ici que le pas de temps journalier soit trop grand pour observer cela : si la neige tombée au cours de la journée fond et s'écoule dans cette même journée, les variations de débit au pas de temps journalier ne se font pas sentir. Ainsi, on peut voir ici l'intérêt futur de poursuivre cette étude par un travail portant sur l'intégration du module neige à un pas de temps plus fin, par exemple, horaire ou tri-horaire.

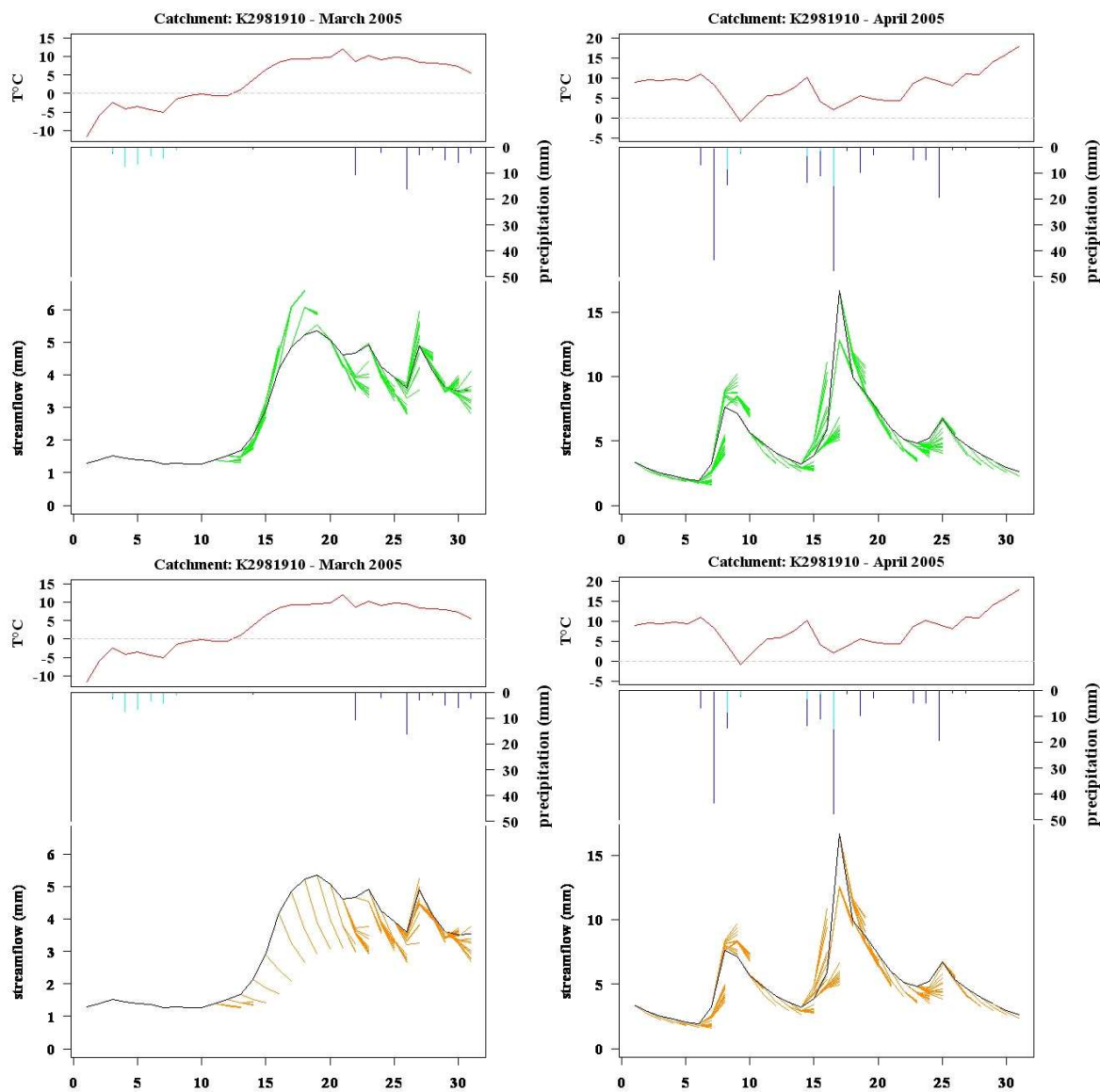


Figure 23 : Hydrogrammes de débits observés (en noir) et prévus par les modèles GR5P (en haut, vert) et GR3P (en bas, orange) de la Dore à Dorat (1523 km²) aux mois de mars (à gauche) et avril 2005 (à droite). Les précipitations (pluie en bleu et neige en cyan) et températures (en rouge) observées sont également indiquées.

- **Erreurs dues aux prévisions en entrée**

Le but de cette étude n'est pas d'évaluer les prévisions PEARP de Météo-France, mais il semble important d'essayer d'observer la part d'erreur dans les débits prévus qui peut être due aux prévisions d'entrée (pluies et températures).

La **figure 24** montre les cartes des ratio-RMSE des prévisions de précipitations (à gauche) et de températures (à droite) sur les deux échéances de prévisions (échéance 1 en haut, échéance 2 en bas). Les bassins sont distingués par leur régime hydrologique : régime nival en carrés, régime de transition en triangles et régime pluvial en cercles. On observe globalement sur cette carte une dégradation des performances avec l'échéance : les ratio-RMSE moyens pour les précipitations sont de 1.66 pour l'échéance 1 et 1.74 pour l'échéance 2. Pour les températures, les ratio-RMSE moyens passent de 0.78 pour l'échéance 1 à 0.81 pour l'échéance 2.

Il est intéressant de noter que les ratio-RMSE pour les précipitations sont tous supérieurs à 1. Cela signifie que toutes les erreurs moyennes (RMSE) sont supérieures à la pluie moyenne. Elles peuvent être jusqu'à presque 2.5 fois cette pluie moyenne. Une correction de ce possible biais dans les prévisions de précipitations pourrait être le sujet d'études futures. En outre, il semble qu'il y ait une dégradation progressive des performances vers le sud-est du Massif Central. Pour les températures

en revanche, les erreurs sont presque toutes plus faibles que les températures moyennes (maximum de ratio-RMSE de 1.06 pour l'échéance 1). Il semble que les plus fortes erreurs soient concentrées sur le Massif Central. Ainsi, on observe que les erreurs normalisées de précipitations dans la prévision d'ensemble sont plus importantes que les erreurs normalisées de températures.

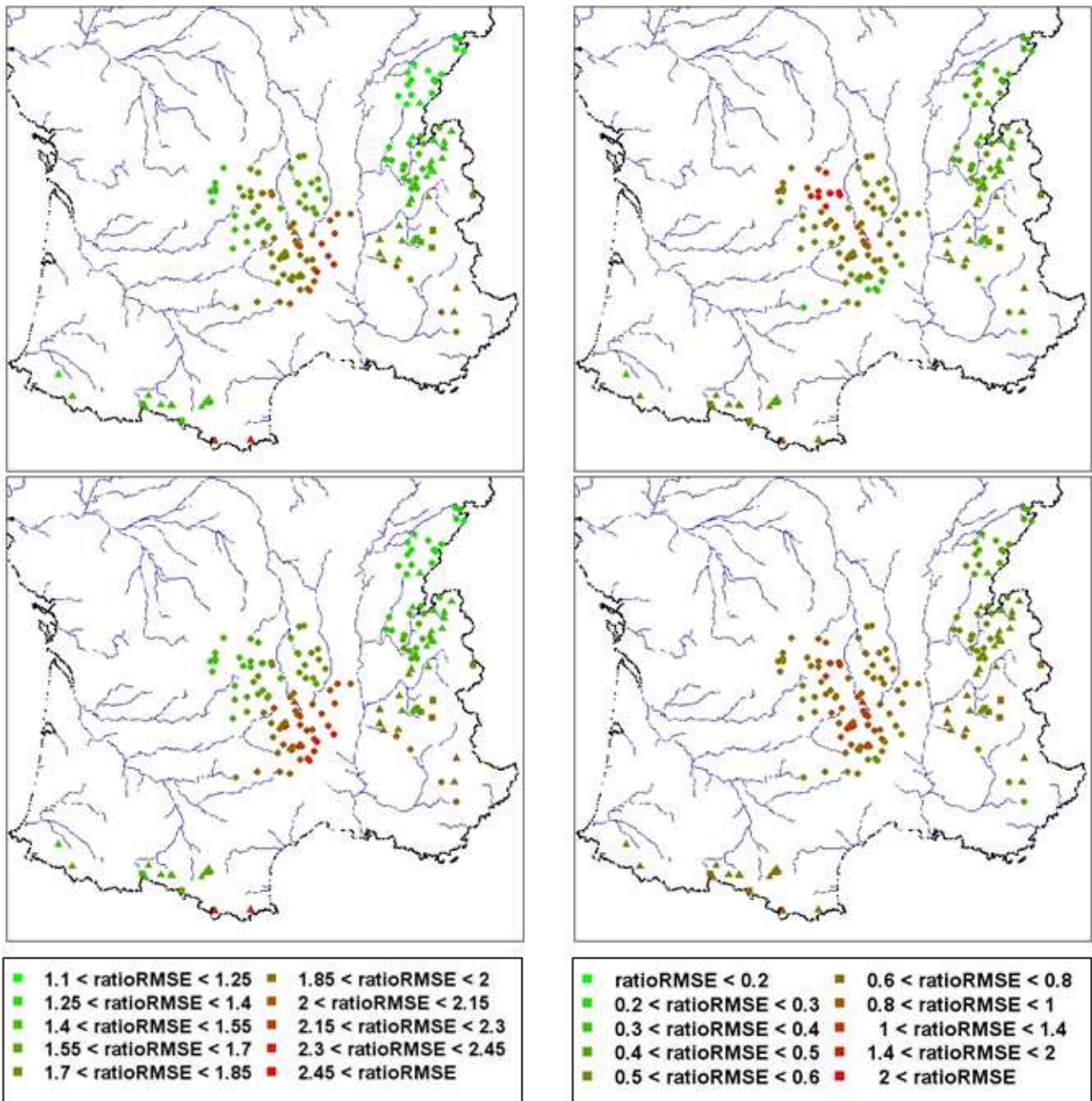


Figure 24 : Valeurs des ratio-RMSE des précipitations (à gauche) et des températures (à droite) pour les échéance 1 (en haut) et 2 (en bas). Les régimes de type nival sont représentés par des carrés, les régimes de transition par des triangles et les régimes de types pluvial par des cercles

Nous avons également examiné si les erreurs des débits pouvaient être reliées aux erreurs de précipitations ou de températures. La **figure 25** montre la relation entre erreurs (ratio-RMSE) des débits issus de GR5P et des précipitations (à gauche) ou des températures (à droite) à l'échéance 1. Les couleurs correspondent aux groupes de régimes hydrologiques : bleu pour le type nival, rouge pour le type de transition et vert pour le type pluvial.

Il apparaît qu'une corrélation entre les erreurs ne semble pas exister à première vue, que ce soit avec les précipitations ou les températures, et quel que soit le type de régime. Néanmoins, l'interprétation n'est pas aisée. En effet, le fait d'avoir deux données d'entrée qui présentent chacune des erreurs par

rapport aux observations ne permet pas de relier les erreurs de l'une ou l'autre entrée aux erreurs de débits. Les erreurs des précipitations et des températures peuvent "interagir" au sein du modèle et soit s'accumuler, soit se compenser. Toutefois, Randrianasolo (2009) a comparé les erreurs de débits de GR3P avec les erreurs des précipitations uniquement (GR3P n'utilise pas les températures). Elle est arrivée à la conclusion qu'il n'existait pas de relations entre ces erreurs. On peut donc légitimement penser que c'est le cas aussi pour le modèle GR5P avec les précipitations et les températures. Ces résultats semblent plutôt normaux puisque le modèle n'est pas linéaire. On remarque quand même que les erreurs des températures sont bien moindres que celles des précipitations. Comparativement aux débits, les erreurs de précipitation (température) sont toutes (en majorité) supérieures aux erreurs de débit (points situés en dessous de la bissectrice).

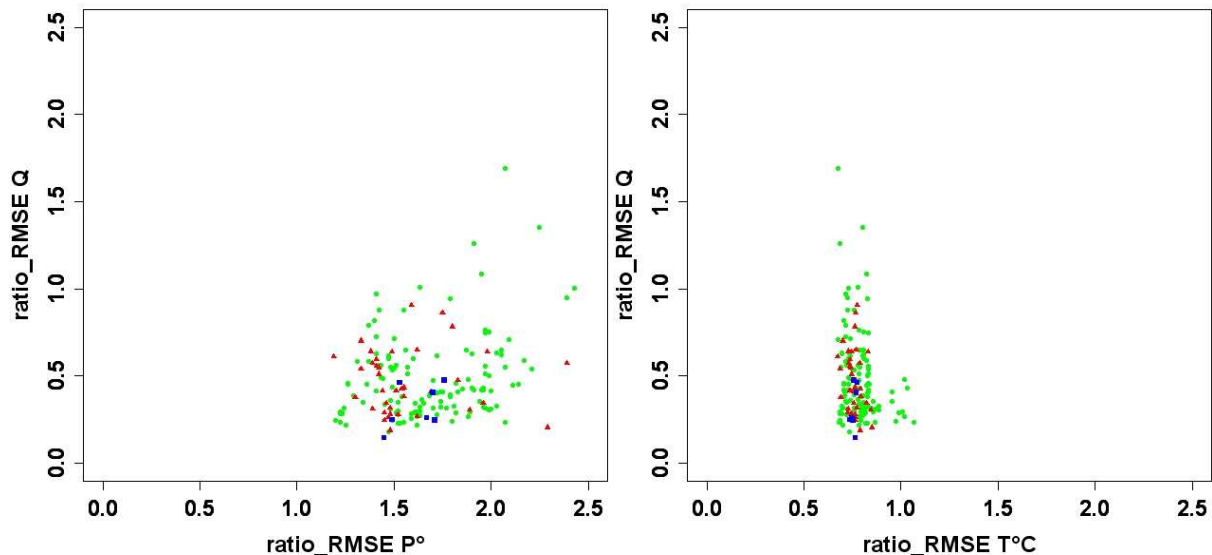


Figure 25 : Relation entre ratio-RMSE des débits prévus par GR5P et des précipitations (à gauche) ou des températures (à droite) prévues par la prévision d'ensemble PEARP (moyenne des 11 membres). Les couleurs correspondent aux groupes de régimes hydrologiques des bassins étudiés (bleu : nival, rouge : de transition, vert : pluvial)

Jusqu'ici, nous avons examiné les erreurs de prévision sur les principales variables météorologiques d'entrée au modèle hydrologique (précipitations et températures). Nous allons examiner maintenant les performances des modèles GR5P et GR3P, selon les scores de performance que nous avons choisis et présentés dans la Partie II.

- **Scores déterministes**

La **figure 26** montre que les performances en ratio-RMSE de GR5P sont globalement meilleures que celles de GR3P. En effet, les valeurs médianes des gains de performance sont toutes situées au dessus de 0 (gain de performance quand $ratio\ GR3P - ratio\ GR5P > 0$), ce qui signifie que les ratio-RMSE de GR3P sont globalement supérieurs aux ratio-RMSE de GR5P, donc moins bons (plus le ratio-RMSE est faible et plus le modèle est performant). Ceci est valable quelque soit le type de régime hydrologique. Tous les bassins de type nival présentent des améliorations de ratio-RMSE, alors que 75 % des bassins de type transition et un peu moins de 75% pour les bassins de type pluvial présentent des améliorations. Le gain est ainsi d'autant plus important que les régimes sont influencés par la neige.

Tout comme en calage/contrôle, il apparaît nettement que le modèle GR5P devient encore plus performant que le modèle GR3P avec l'échéance de prévision : les gains sont globalement plus importants à la deuxième échéance de prévision et l'on peut penser que pour des échéances plus lointaines cette tendance se confirmerait. Par ailleurs, les gains plus importants avec l'évolution de l'échéance sont également plus importants pour les régimes influencés par la neige.

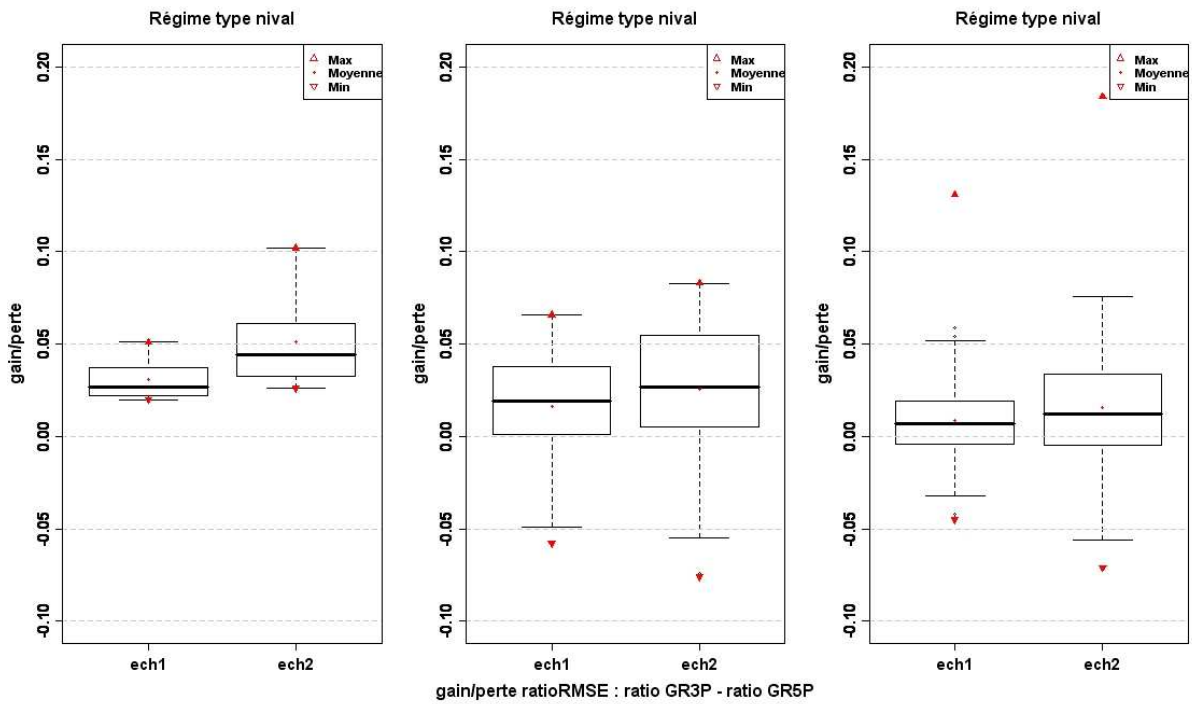


Figure 26 : Distribution des gains de performances en RMSE de GR5P en fonction des différents régimes hydrologiques

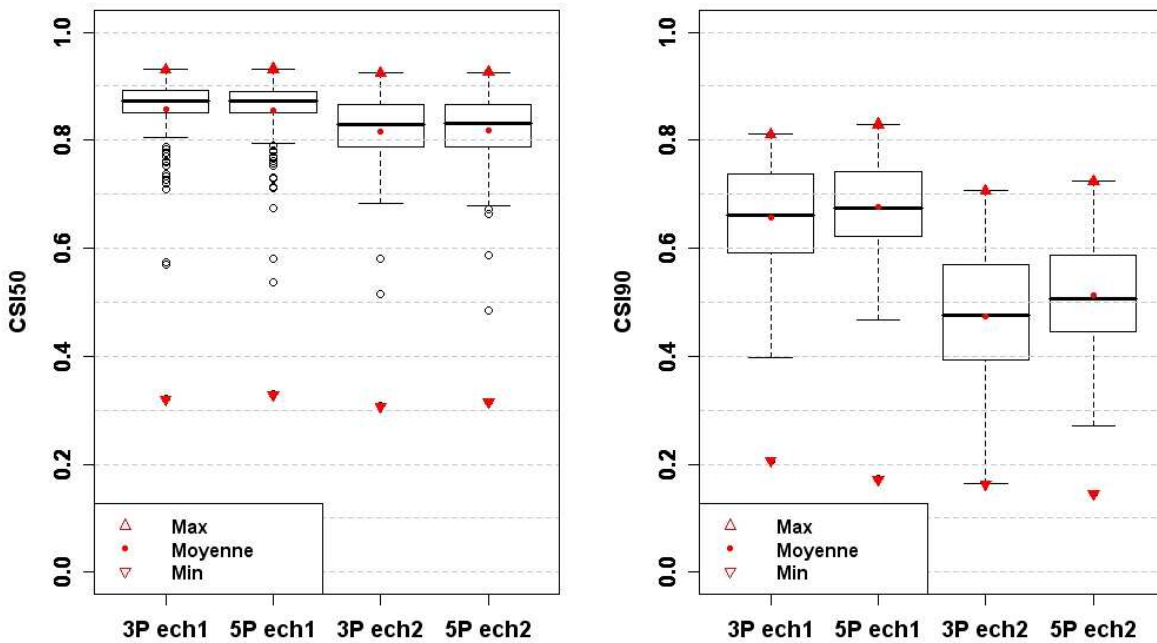


Figure 27 : Performances en CSI des modèles GR (5P, avec module neige et 3P, sans module neige) pour les deux échéances de prévisions ($j+1$, ech1 et $j+2$, ech2), et pour des dépassements de seuil de débit Q50 (quantile 50%, à gauche) et Q90 (quantile 90%, à droite)

La **figure 27** présente la distribution des valeurs du score CSI pour les dépassements des seuils Q50 (50% des débits observés) et Q90 (90% des débits observés). Plus le CSI est élevé, plus le modèle est performant. Les valeurs du CSI50 sont quasi-similaires pour GR5P et GR3P, même si GR3P est légèrement supérieur ici, que se soit pour l'échéance 1 ou 2 de prévision. On remarque que les performances sont déjà très bonnes pour le modèle GR3P (0.86 pour l'échéance 1 et 0.82 pour l'échéance 2) : le modèle prévoit 85% du temps le dépassement de seuil pour 75% des bassins à l'échéance 1. Il est donc naturellement difficile pour le modèle GR5P de battre ce score déjà élevé pour le modèle GR3P. Pour le CSI 90 en revanche, les performances sont meilleures pour le modèle GR5P. Même si pour les deux modèles les performances sont moins bonnes que pour le CSI50 (les

modèles ont en général plus de difficultés à prévoir les évènements plus forts), elles restent très satisfaisantes : à l'échéance 1, le modèle GR5P prévoit 60% du temps le dépassement de seuil pour plus de 75% des bassins. Les performances sont meilleures pour le modèle GR5P, et d'autant plus avec l'échéance de prévision (gain de 0.01 à l'échéance 1 et de 0.03 à l'échéance 2) par rapport au modèle GR3P.

- **Scores probabilistes**

Tous les critères calculés précédemment considèrent soit la moyenne de la prévision d'ensemble, soit chaque membre de la prévision comme une prévision déterministe. Pour la suite, nous allons présenter les résultats des critères qui prennent en compte l'aspect probabiliste des prévisions d'ensemble.

Le BS et le BSS permettent de caractériser le comportement du système de prévision par rapport à un évènement binaire de dépassement de seuil.

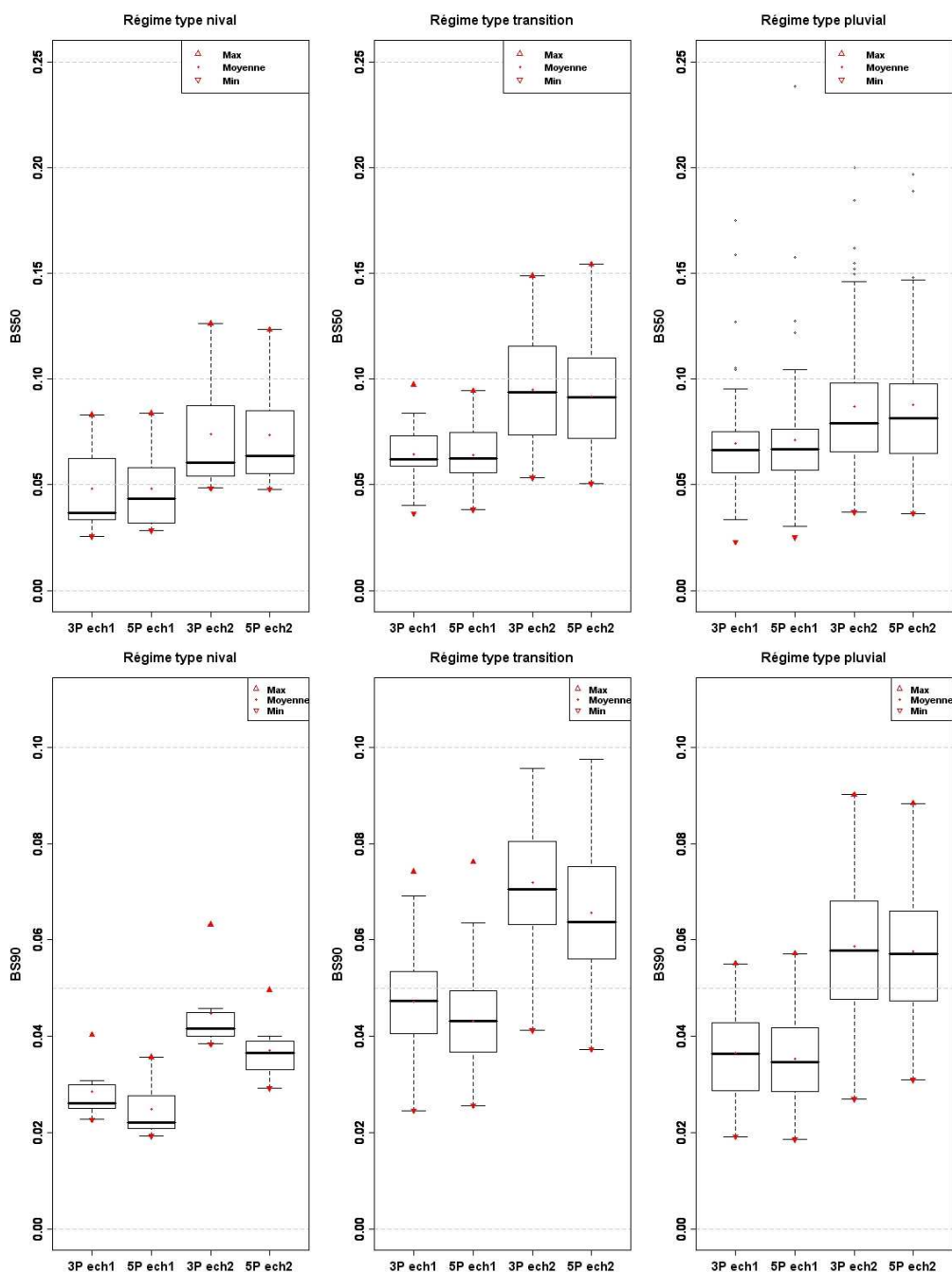


Figure 28 : Performances en BS pour des dépassements de seuils de débit Q50 (en haut) et Q90 (en bas) aux deux échéances de prévision et en fonction des régimes hydrologiques

La **figure 28** présente les performances en BS des deux modèles en fonction des régimes hydrologiques et pour les dépassements des seuils Q50 et Q90. Plus le BS est proche de 0, plus le modèle est performant. Les valeurs de BS50 mettent en évidence des performances légèrement meilleures pour GR3P, notamment à l'échéance 1, pour les régimes de type nival et pluvial, alors que GR5P est légèrement meilleur pour les régimes de transition. Néanmoins, les performances restent très proches et sont globalement bonnes dans l'ensemble : moyennes de 0.068 pour GR3P et 0.069 pour GR5P à l'échéance 1, et 0.088 pour les deux modèles à l'échéance 2. Par contre, pour le BS90, le modèle GR5P fournit majoritairement de meilleures performances que GR3P, et les différences de performances sont plus importantes et d'autant plus avec l'échéance de prévision. Dans l'ensemble, les performances sont aussi meilleures que pour le BS50 : moyennes de 0.039 pour GR3P et 0.037 pour GR5P à l'échéance 1, et 0.061 pour GR3P et 0.059 pour GR5P à l'échéance 2. On remarquera ici que les meilleures performances en BS sont données pour les bassins de régime hydrologique de type nival ici, alors que pour les autres scores (RMSE, CSI) les meilleures performances étaient données par les régimes de type pluvial.

La **figure 29** présente les performances en RPSS pour les deux échéances de prévision en fonction des régimes hydrologiques. Si le RPSS est supérieur à 0, alors le modèle évalué (GR5P ici) fournit de meilleures performances que le modèle de référence (GR3P ici). Les graphiques montrent une amélioration des performances pour près de 75% des bassins de type nival et de transition, et une dégradation des performances pour un peu plus de 50% des bassins de type pluvial, à l'échéance 1. A l'échéance 2, on observe une amélioration des performances avec GR5P pour plus de 90% des bassins de type nival, plus de 75% des bassins de type transition et plus de 50% des bassins de type pluvial. Les performances sont d'autant meilleures que l'échéance de prévision augmente. Ici, ce sont les régimes de transition qui fournissent les plus importantes améliorations de performance.

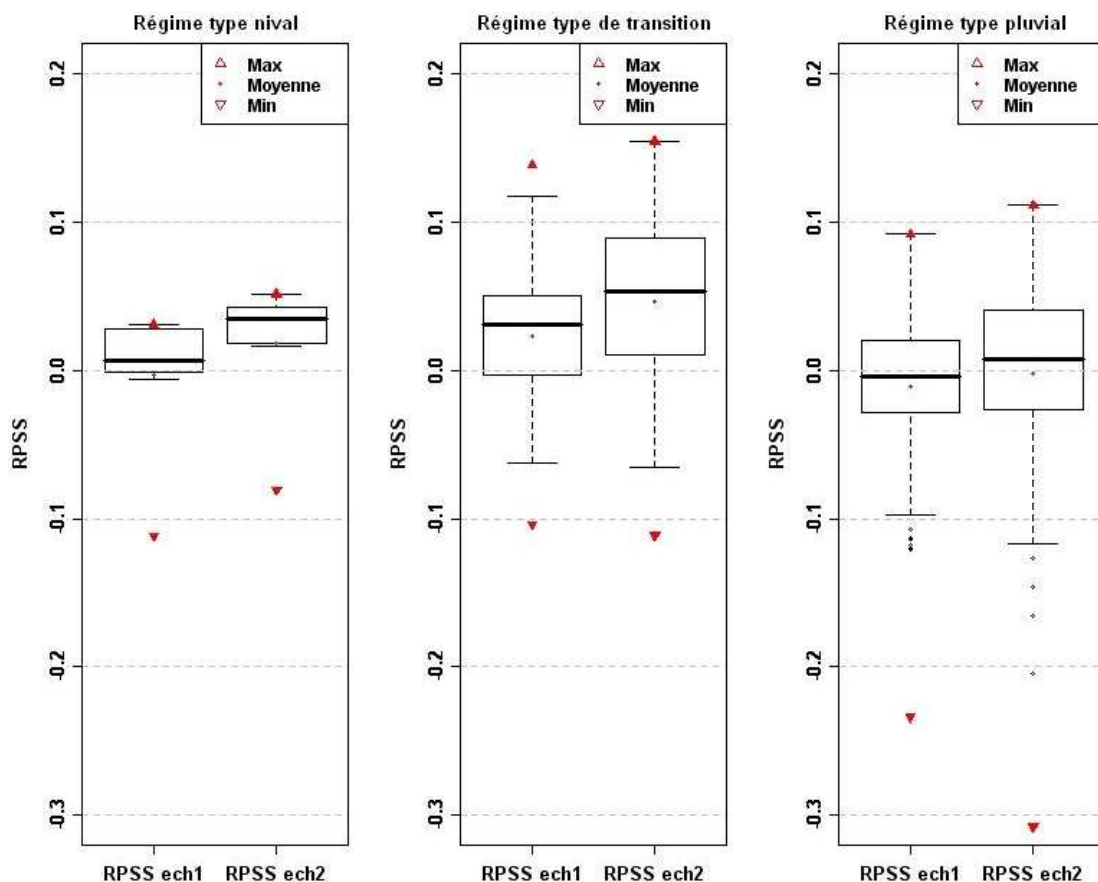


Figure 29 : Performances en RPSS aux deux échéances de prévision et en fonction des régimes hydrologiques

En conclusion de cette partie, nous avons pu voir que :

- Pour les précipitations et les températures :
 - les erreurs normalisées moyennes sont de l'ordre de 0.8 fois la température moyenne pour les températures et de 1.7 fois la pluie moyenne pour les précipitations : les erreurs normalisées sont plus importantes pour les précipitations et peuvent être très élevées ;
 - les erreurs normalisées augmentent avec l'échéance de prévision ;
 - les erreurs des données d'entrée de prévision ne peuvent *a priori* pas être reliées aux erreurs de débits prévus. Une correction facile et directe des erreurs des débits prévus ne peut pas être faite : des études plus poussées sont nécessaires.

- Pour les débits :
 - les performances des deux modèles de prévision hydrologique évalués, GR3P sans module neige et GR5P avec module neige, sont globalement bonnes ;
 - les performances des deux modèles diminuent avec l'échéance de prévision ;
 - les performances de GR5P sont globalement meilleures que celles de GR3P pour tous les critères, excepté le score déterministe CSI50 ;
 - les gains de performances pour GR5P sont d'autant plus importants que le seuil à dépasser est élevé : il semblerait que, globalement, la prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique permet de mieux prévoir les débits les plus élevés ;
 - les gains de performances sont plus importants avec l'augmentation de l'échéance de prévision ;
 - les gains de performances sont plus importants sur les bassins plus influencés par la neige dans leur régime hydrologique.

Conclusions et perspectives

Après avoir présenté le nouveau modèle hydrologique de prévision GR5P constitué des modèles GR3P et du module de prise en compte de la neige Cemaneige, nous avons pu évaluer l'apport de ce dernier 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 nous a permis d'avoir un aperçu des performances en prévision déterministe (cas des prévisions parfaites, où la prévision météorologique est remplacée par les observations) par l'analyse en contrôle. Les résultats ont montré que le modèle GR5P présentait de meilleurs résultats que son équivalent sans module neige. Les résultats devenaient même encore meilleurs avec l'augmentation de l'influence de la neige sur les débits, et également avec l'échéance de prévision. En effet, dans ce dernier cas, l'assimilation du dernier débit observé à l'instant de prévision avait tendance à diminuer l'utilité d'un module neige, puisque les différences de débits simulés s'en trouvaient réduites. Ces résultats ouvrent de bonnes perspectives sur l'évaluation du modèle en conditions de prévisions réelles pour la prévision déterministe. L'évaluation des performances du modèle GR3P avec module neige, où les paramètres libres du module sont fixés, a montré des performances également très satisfaisantes et même meilleures que GR3P sans module neige. Ceci ouvre également des perspectives pour des études et applications opérationnelles sur des bassins versants non jaugés, où le calage des paramètres est une tâche délicate, voire parfois impossible.

D'autre part, nous avons pu évaluer l'apport du nouveau modèle hydrologique de prévision GR5P en condition de prévisions d'ensemble, en utilisant les 11 scénarios de la prévision météorologique PEARP de Météo-France. 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. De plus, les résultats peuvent être contradictoires, en ce sens que les conclusions obtenues par l'analyse d'un critère peuvent ne pas être compatibles avec un autre.

Néanmoins, nous avons tâché dans cette étude de présenter une vision globale de chacun des critères d'évaluation probabiliste étudié, et nous avons remarqué que les performances associées au nouveau modèle GR5P étaient très majoritairement meilleures que celles de GR3P. Globalement, les conclusions sont les mêmes que pour la prévision déterministe parfaite : le modèle GR5P devient encore meilleur avec l'augmentation de l'influence de la neige sur les débits, et avec l'échéance de prévision. Dans le cadre de la prévision des crues, les scores qui utilisent des seuils de débits ont montré un gain plus important de performances pour le modèle GR5P quand on s'intéresse notamment aux plus forts débits.

Même si le modèle 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 GR3P apporte des améliorations conséquentes pour la prévision hydrologique.

Références bibliographiques

- Berthet L., Andréassian V., Perrin C., Javelle P., 2009, How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 819–831.
- Dacharry M., 1997, dictionnaire français d'hydrologie (article régime des cours d'eau), <http://91.121.162.160/glu/FRDIC/DICREGIM.HTM>, consulté le 04/03/10.
- Franz K. *et al.*, 2008, Snow model verification using ensemble prediction and operational Benchmarks, *Journal of Hydrometeorology* 9:6, 1402-1415
- Hingray B., Picouet C., Musy A., 2009, *Hydrologie, une science pour l'ingénieur*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 600 p.
- Jolliffe IT, Stephenson DB (eds). 2003. Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. John Wiley and Sons: Chichester, West Sussex, England; 240p
- Lamblin R., 2009, *Prévision des crues aux confluences - Impact de la spatialisation sur les performances des modèles hydrologiques de prévision*. Mémoire de Master 2, Hydrologie, hydrochimie, sols et environnement, Spécialité hydrologie, ENSIACET, ENSEEIHT, INP Toulouse, 30 pp.
- Manuel d'utilisation GRP (consulté le 09/04/10) : http://www.cemagref.fr/webgr/Modeles/GRP/fonctionnement_GRP.htm
- Musy A., Higy C., 2004, *Hydrologie, une science de la nature*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 314 p.
- 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.
- 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.
- Paradis E., 2005, *R pour les débutants*, Université de Montpellier II, Montpellier, 81p.
- Pardé M., 1955, *Fleuves et rivières (3ème édition)*, Armand Colin, 223 p.
- Perrin C., 2000, *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, Paris, 530 p.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2001, Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. of Hydrology*, 242, 275-301.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2003, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. of Hydrology*, 279 (1-4), 275-289.
- 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.
- Ramos M.H., Thielen J., Pappenberger F., 2008, Using weather ensembles for operational flood forecasting and early warning. *Colloque SHF Prévisions hydrométéorologiques*, Lyon, 18-19/11/2008, 191-199. In French.
- Ramos M.H., Thielen J., de Roo A., 2009, *Prévision hydrologique d'ensemble et alerte avec le système européen d'alerte aux crues (EFAS) : cas des crues du bassin du Danube en août 2005*. In: *Tanguy, J.-M. (Direction), Traité d'hydraulique environnementale - Volume 7 : applications*

- des modèles numériques en ingénierie 1, Chapitre 5. Ed. Hermès Lavoisier, Octobre 2009, Paris, France, 190p. ISBN : 978-2-7462-2337-0.
- Randrianasolo A., 2009. *Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues*. Mémoire de Master. AgroParisTech, ENGREF, Université Pierre et Marie Curie, Cemagref, Antony, Juin 2009, 50 p.
- Randrianasolo A., Ramos M.H., Thirel G., Andreassian V., Martin E., 2010, Comparing the scores of hydrological ensemble forecasts issued by two different hydrological models. *Atmospheric Science Letters*, DOI: 10.1002/asl.259.
- Ranzi R, Bacchi B, Ceppi A, Cislighi M, Ehret U, Jaun S, Marx A, Hegg C, Zappa M. 2009. Real-time demonstration of hydrological ensemble forecasts in MAP D-PHASE. *La-Houille-Blanche*. 5. 95-103
- Rousset Regimbeau, F., Habets, F., Martin, E., Noilhan, J., 2007, Ensemble streamflow forecasts over France. *ECMWF Newsletter* 111, 21-27.
- Sauquet E., 2006, *Cartographie des écoulements moyens mensuels en France*, note de synthèse CEMAGREF, 92 p.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaïa I., 2008, Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France, *Hydrology Research*, vol 39 n°5-6, p 403-423.
- Tangara M., 2005, *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, EPHE, Cemagref, Paris, 374 p.
- Thielen J, Bartholmes J, Ramos MH, de Roo A., 2009. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2): 125–140.
- Thirel G., Rousset-Regimbeau F., Martin E., Habets F., 2008, On the Impact of Short-Range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Prediction. *Journal of hydrometeorology*, 9, 1301-1317.
- Thirel G., 2009, *Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU*, thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, CNRM/GAME Météo-France/CNRS, 252 p.
- 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.
- 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*.
- Weeink W., 2010, *Thresholds for flood forecasting and warning - Evaluation of streamflow and ensemble thresholds*, Mémoire de Master. University of Twente, Cemagref Antony, juin 2010, 88 p.

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Débits observés et simulés avec le modèle GR4J (sans module neige) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon (3580 km ²) pour la période d'août 2001 à août 2002 (tiré de Valéry, 2010)	9
Figure 2 : Exemples de chroniques de précipitations (pluie en bleu foncé, neige en bleu clair), températures (vert) et débit (rouge) sur les bassins de l'Isère à Val d'Isère (46 km ²), l'Ire à Doussard (25 km ²) et la Faye à Olliergues (72 km ²) en 2004	13
Figure 3 : Prévisions d'ensemble ARPEGE (PEARP) à 2 jours d'échéance (P1 à P11, pour les 11 membres de l'ensemble) et observations SAFRAN (Pobs) pour les précipitations du 02/11/2008 sur la France.....	14
Figure 4 : Carte de localisation des 176 bassins versants étudiés	15
Figure 5 : Hydrogrammes de référence pour les 12 groupes de régimes hydrologiques proposés par la classification de Sauquet (2006) et carte de France (d'après Sauquet, 2006).....	17
Figure 6 : Températures moyennes (à gauche) et pourcentage annuel moyen de neige par rapport aux précipitations totales (à droite) pour les 12 groupes de régime hydrologique constitués par l'analyse des 176 bassins versants de l'étude.	19
Figure 7 : Les régimes hydrologiques de 176 bassins versants à partir de la classification de Sauquet (groupes 1 à 12) et du regroupement fait dans cette étude (groupes a : dominante pluviale, b : transition et c : dominante nivale). La taille des points indique la distance à chaque régime : plus la distance est faible, plus le point est gros.	20
Figure 8 : Structure du modèle GR3P utilisé dans l'étude et ses trois paramètres libres : X1 (ROUT), X2 (CORR) et X3 (TB) (d'après Tangara, 2005)	21
Figure 9 : Courbe hypsométrique et discrétisation spatiale en 5 bandes d'altitude (exemple du bassin de la Bourne aux Jarrands).....	22
Figure 10 : Structure de Cemaneige pour une bande d'altitude z (tiré de Valéry, 2010)	25
Figure 11 : Distribution des performances en C2MP en fonction de la capacité du réservoir de production.....	30
Figure 12 : Distribution des performances en fonction de l'initialisation des paramètres libres Kf et CTg.....	31
Figure 13 : Distribution des performances en fonction de l'utilisation d'un gradient fixe ou variable.....	32
Figure 14 : Evolution des performances avec l'échéance de prévision	32
Figure 15 : Exemple d'évolution des valeurs des paramètres calés avec l'échéance pour trois bassins aux performances différentes	33
Figure 16 : Performance des modèles GR5P avec et sans paramètres libres pour Cemaneige et comparaison avec les performances de GR3P	33
Figure 17 : Cartes des valeurs des paramètres calés à la première échéance de prévision	34
Figure 18 : Corrélogramme des performances de GR5P en fonction de GR3P (à gauche) et carte des améliorations et dégradation des performances en fonction des régimes hydrologiques (à droite).....	35
Figure 19 : Performances des modèles GR5P et GR3P en fonction des régimes hydrologiques pour tous les débits (à gauche) et pour les débits supérieurs au débit moyen (à droite)	36
Figure 20 : Performances des modèles GR5P et GR3P en fonction des régimes hydrologiques pour les mois de mars à août (03/08) et septembre à février (09/02).....	37
Figure 21 : Evolution des gains de performance avec l'échéance de prévision en fonction des régimes hydrologiques.	38
Figure 22 : Données observées et prévues pour la Loire à Usclades-et-Rieutord (Ardèche, 62 km ²) en Avril et Octobre	39
Figure 23 : Hydrogrammes de GR5P (en haut) et GR3P (en bas) de la Dore à Dorat (1523 km ²) aux mois de mars et avril 2005. Les précipitations et températures sont celles observées dans notre base de données.	41
Figure 24 : Valeurs des ratio-RMSE des précipitations (à gauche) et des températures (à droite) pour les échéance 1 (en haut) et 2 (en bas).....	42
Figure 25 : Relation entre ratio-RMSE des débits et des précipitations (à gauche) ou des températures (à droite). Les couleurs correspondent aux groupes hydrologiques (bleu : nivale, rouge : de transition, vert : pluvial)	43
Figure 26 : Distribution des gains de performances en RMSE de GR5P en fonction des différents régimes hydrologiques.....	44

Figure 27 : Performances en CSI des modèles GR5P et GR3P pour les deux échéances de prévisions, et pour des dépassements de seuil de débit Q50 (à gauche) et Q90 (à droite).....	44
Figure 28 : Performances en BS pour des dépassements de seuils de débit Q50 (en haut) et Q90 (en bas) en fonction des régimes hydrologiques.....	45
Figure 29 : Performances en RPSS aux deux échéances de prévision en fonction de chaque régime hydrologique.....	46
Tableau 1 : Principales caractéristiques des bassins versants étudiés (entre crochets, valeurs minimales et maximales et, en bas, valeur médiane sur 176 bassins).....	15
Tableau 2 : Classification des 176 bassins versants de l'étude selon les régimes hydrologiques proposés par Sauquet (2006).....	18
Tableau 3 : Tableau de contingence en prévision.....	27

Résumé

La prévision hydrologique présente des enjeux considérables : protection des hommes et des biens, production d'énergie, etc. Bien prévoir les débits est donc 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. L'introduction d'un module neige au sein d'un modèle de prévision hydrologique devrait permettre d'améliorer la simulation des débits pour les bassins versants dont les débits sont influencés par la neige, tout en ne dégradant pas la prévision sur les autres bassins. Cette étude vise à évaluer l'amélioration apportée par l'intégration du module Cemaneige au modèle de prévision hydrologique GR3P, les deux étant des outils développés au Cemagref.

Une analyse comparative des modèles de prévision GR3P (sans module neige) et GR5P (GR3P + module neige) au pas de temps journalier a été réalisée sur un échantillon de 176 bassins versants français situés dans des massifs montagneux. Les prévisions hydrologiques utilisent en entrée 4 années de prévisions météorologiques d'ensemble PEARP de Météo-France (2005 à 2009). Ainsi, 11 scénarios équiprobables de débits sont prévus à deux échéances de prévisions ($j+1$ et $j+2$). L'étude a consisté en l'introduction du module neige au sein de la structure du modèle GR3P, et en l'évaluation de ce nouveau modèle en prévision d'ensemble.

A l'issue de ce travail, il est apparu que le modèle GR5P était plus performant que sa version sans traitement de la neige. GR5P démontre toute son utilité lorsque l'échéance de prévision augmente. En effet, la mise à jour du débit, c'est-à-dire, l'assimilation dans le modèle du dernier débit observé, a tendance à minimiser les différences entre les deux modèles (GR3P et GR5P) à la première échéance. 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 ces différents types de bassin. Les résultats ouvrent des nouvelles perspectives sur l'adaptation de la modélisation au pas de temps horaire.

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