

# Méthode de prévision des apports par fusion nivale appliquée à la gestion de la ressource en eau en montagne

Etienne DOMMANGET, Benjamin GRAFF

CNR - Compagnie Nationale du Rhône - e-mail: [e.dommanget@cnr.tm.fr](mailto:e.dommanget@cnr.tm.fr)

**RÉSUMÉ.** – La gestion de la ressource en eau dans les zones de montagne est un enjeu majeur. Elle doit concilier des usages multiples : hydroélectricité, irrigation, tourisme... Evaluer le volume d'eau stockée dans le manteau neigeux est stratégique, car il contribue largement au remplissage des retenues après l'hiver.

Pour répondre au besoin d'anticiper les apports à venir liés à la fusion nivale, la Compagnie Nationale du Rhône a développé des outils de prévision pour les retenues de la SHEM. Ces outils s'appuient en particulier sur les sorties du modèle Crocus de Météo France. Développé pour la prévision des risques d'avalanche, Crocus permet de calculer l'équivalent en eau du manteau neigeux (EEN). L'EEN permet d'estimer le volume d'eau stockée sous forme de neige. L'analyse des corrélations entre les estimations d'EEN et les apports observés a permis de valider l'utilisation de Crocus pour la prévision des apports.

Un modèle de prévision d'apports fondé sur le principe degré-jour a été développé. Il est initialisé par les sorties Crocus et utilise des reconstitutions stochastiques de variables climatologiques compatibles avec les tendances saisonnières prévues pour simuler l'évolution du manteau neigeux. Le modèle est utilisé en opérationnel depuis 2012 et permet d'adapter la gestion de la ressource en eau en fonction des prévisions.

Après une présentation du contexte et de la méthodologie mise en œuvre, nous détaillons les résultats obtenus en 2012 et 2013 pour le Lac de l'Oule (Vallée de la Neste d'Aure, Hautes-Pyrénées).

Mots-clés : prévision d'apports, fusion nivale, équivalent en eau de la neige, Crocus, degré-jour

## Snowmelt inflow forecasting method for mountain water resource management

**ABSTRACT.** – Water supply management is becoming more and more specific, especially in managing complex uses of mountain water reservoirs: hydroelectricity, agriculture or tourism. Those challenges imply to care about the reservoirs filling. Snow storage and melting represent a big part of the reservoirs storage from spring to summer. Our aim is to assess snow storage capacity and to forecast its melting timing. So as to develop such models, different sorts of data have been used: historical series of reservoirs provisions flows, hydrometeorological data from the valley power plant station, snow water equivalent simulated by Crocus, the Météo France avalanche risk forecasting model.

Crocus datasets are spatialized on the whole catchment using an appropriate digital elevation model. The use of this Crocus snow water equivalent data has been validated through analysis of its correlation with observed inflows. Indeed, snow melt water flows deduced from Crocus fit well with inflows from February to July. Thus, a snowmelt inflows forecasting model based on a conceptual degree-day method and initialized with Crocus data has been developed. It uses temperature and precipitation data to calculate the snow cover and the hydrological flows of mountains catchments. Historical meteorological data are employed to generate a hundred of artificial random new series in order to deliver a probabilistic flow forecast. These chosen data match to seasonal meteorological trends, provided by CNR forecasters. Also, uncertainties from model settlement have been introduced to perform the probabilistic forecast.

The degree-day model, which presents 8 parameters, has been calibrated on 1994-2010 historical data and validated on years 2012 and 2013. This model was developed in 2011 on the Oule lake catchment. It has been used operationally since 2012 and operational feedbacks are hopeful. Indeed, results are good and forecasted meteorological trends help to get better forecasting. Forecasts for the years 2012 and 2013 are presented, since those years are of particular interest regarding water resource management, because of their, respectively, unusually dry and snowy climatology.

Key-words: hydrologic forecasting, snow melt, snow water equivalent, degree-day

## I. INTRODUCTION

La gestion de la ressource en eau des retenues de montagne doit concilier des usages multiples : production hydroélectrique, fourniture d'eau pour les usages agricoles, soutien d'étiage, écrêtement de crue et respect de cotes touristiques. La difficulté de cette gestion est liée à la faible densité des stations de mesure et à la variabilité hydro-climatique en zone de montagne. De plus, la majeure partie des apports se concentre durant le printemps et au début de

l'été sous forme de fusion de la neige accumulée au cours de l'hiver. Pour la Société Hydro-Electrique du Midi (SHEM), gestionnaire d'une dizaine de retenues dans les Pyrénées, l'évaluation au cours du printemps du volume d'eau stocké par le manteau neigeux et la prévision des volumes d'apports à venir dans les retenues d'ici la fin de la saison de fonte représentent donc de forts enjeux.

En tant que pôle hydraulique du groupe ENGIE, CNR est en charge de l'optimisation de la valorisation de l'énergie de la SHEM dans le marché de l'électricité, et a développé pour

ce faire des outils de prévision spécifiques des apports par fusion nivale.

Du 1<sup>er</sup> février au 15 juillet, CNR établit sur les retenues SHEM des prévisions d'apports tous les 15 jours pour la période comprise entre la date de prévision et la fin de la saison de fonte. Les conditions initiales caractérisant l'état du manteau neigeux à la date de la prévision sont fournies par l'équivalent en eau de la neige (EEN) calculé par le modèle Crocus de Météo France. L'évolution du manteau neigeux est calculée par une modélisation degré-jour, en fonction de scénarii hydrométéorologiques simulés sur la base des observations antérieures et conditionnées par des tendances de prévision saisonnière.

Dans la suite de l'article, nous présentons la méthode mise en œuvre et ses conditions d'exploitation. Les performances de la méthode sont évaluées sur les données du bassin versant du lac de l'Oule dans les Hautes-Pyrénées.

## II. SITE D'ÉTUDE

Les lacs de l'Oule et d'Orédon, d'une capacité totale de 23,9 hm<sup>3</sup>, se situent dans la vallée d'Aure en Haute-Bigorre. Ils appartiennent au groupement d'Eget exploité par la SHEM. Conjointement avec les retenues de la vallée voisine du Louron, gérées également par la SHEM, les lacs d'Oule et d'Orédon sont astreints à mettre à disposition 48 hm<sup>3</sup> pour l'irrigation à la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne du 15 juin au 28 février.

La gestion des lacs de l'Oule et d'Orédon par la SHEM doit donc être optimisée de manière à concilier les différents usages de la ressource, principalement la production d'énergie et les débits pour l'agriculture. La prévision des apports par fusion nivale prend toute son importance dans ce contexte.

Le Lac de l'Oule se situe à une altitude de 1816 m et draine des altitudes allant jusqu'à 2721 m au Pic de Bastan (altitude médiane du bassin versant à 2260 m). D'une capacité de 16,6 hm<sup>3</sup>, la retenue est alimentée par le bassin versant naturel du lac, ainsi que par la prise d'eau des

Merlans en rive gauche et par des transferts d'eau depuis le lac d'Orédon.

D'une capacité de 7,3 hm<sup>3</sup>, le lac d'Orédon est quant à lui situé sur la Neste de Couplan, un kilomètre en aval du lac de Cap-de-Long, lui-même exploité par EDF.

La superficie totale du bassin versant drainé par le lac de l'Oule est de 41,5 km<sup>2</sup>, répartie entre le bassin naturel (23,8 km<sup>2</sup>), le bassin versant des Merlans (4,7 km<sup>2</sup>) et le bassin du lac d'Orédon situé entre le barrage de Cap-de-Long et le barrage d'Orédon (13 km<sup>2</sup>). Dans la suite de l'étude, nous traitons uniquement le cas du bassin versant naturel du lac de l'Oule, soit 23,8 km<sup>2</sup> où nous disposons de toutes les données nécessaires.

## III. DONNÉES D'ENTRÉE DE LA MÉTHODE

Nous présentons dans ce paragraphe les données utilisées en entrée de la méthode de prévision des apports par fusion nivale. Ces données sont réparties entre les mesures et observations de terrain fournies par la SHEM et les sorties du modèle Crocus fournies par Météo France.

### III.1. Données SHEM

La SHEM procède à de nombreux relevés hydrométéorologiques dont les données sont utilisées dans la construction de la méthode :

- apports au lac de l'Oule reconstitués à partir des débits turbinés, des variations du niveau de la retenue et des conditions d'exploitation (déversements, débits réservés, transferts...); Les données sont disponibles depuis le 01/01/1994 au pas de temps journalier ;
- données météorologiques disponibles depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1944 à la station d'Eget (1017 m) :
  - températures journalières minimales et maximales, dont on déduit la température journalière moyenne, utilisée par la suite ;
  - cumuls journaliers de précipitations ;

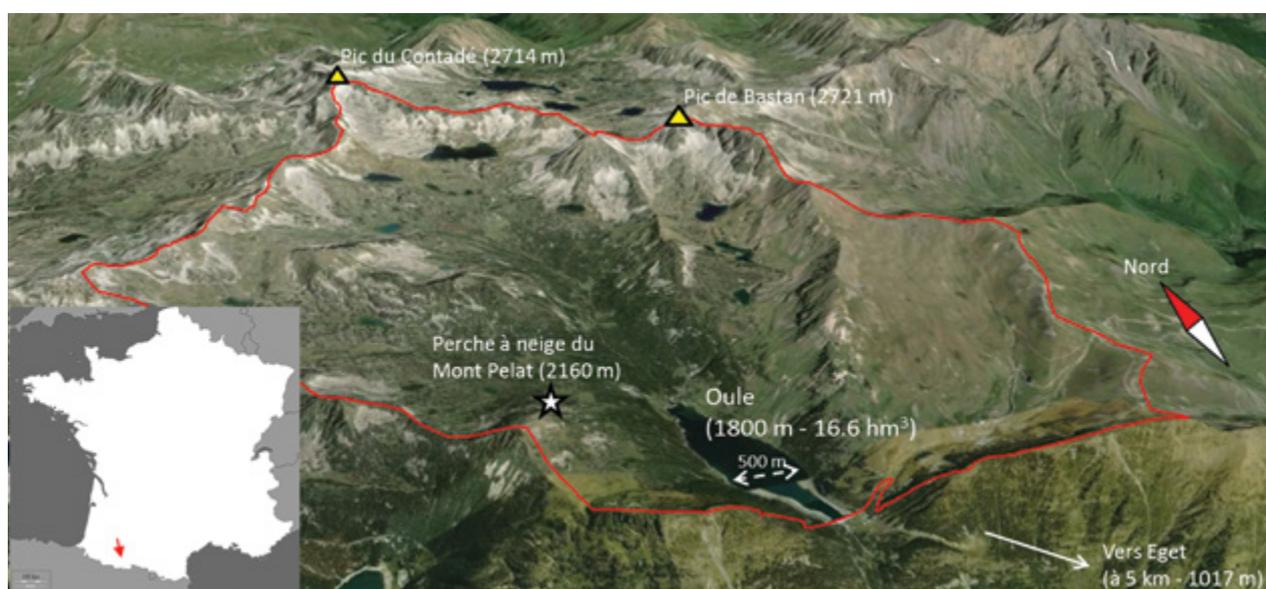


Figure 1 : Bassin versant du Lac de l'Oule (image Google Earth).

— mesures de l'enneigement à la perche à neige du Mont Pelat (2160 m). Les carottages sont réalisés manuellement par le personnel de la SHEM (mesure d'épaisseur de neige et d'équivalent en eau). Les données sont généralement disponibles en fin de mois en fonction des conditions météorologiques et des conditions d'accès. Les relevés sont réguliers entre 2000 et 2006 puis ont repris en 2012. Au total, 45 mesures sont disponibles.

### III.2. L'EEN fourni par le modèle Crocus de Météo France

#### III.2.1. Présentation du modèle Crocus

Développé à Météo France (Brun *et al.* 1989 et 1992), Crocus est un modèle numérique unidimensionnel fondé sur la thermodynamique simulant le bilan d'énergie et de matière du manteau neigeux. Il a pour principal objectif de décrire de façon détaillée l'évolution des propriétés internes du manteau neigeux (transfert thermique, transfert radiatif) en s'appuyant sur une description semi-quantitative de l'évolution des propriétés morphologiques des grains de neige au cours de leur métamorphisme. Cette description permet de représenter de façon réaliste les flux d'énergie et de matière aux interfaces du manteau neigeux (sol et atmosphère) (CNRM, oct. 2013).

Le modèle Crocus s'inscrit dans la chaîne de prévision SAFRAN-Crocus-MEPRA (SCM), conçue par le Centre d'Etudes de la Neige de Météo France pour la prévision du risque avalanche. La chaîne SCM est composée de trois modules : un système d'analyse météorologique (SAFRAN, (Durand, *et al.*, 1993)), fournissant les données d'entrée pour un modèle d'évolution du manteau neigeux (Crocus) et un système expert (MEPRA) qui analyse les profils du manteau neigeux simulé en termes de risque.

Alimenté par les sorties météorologiques de SAFRAN, Crocus prend en compte les principaux processus physiques intervenant dans le manteau neigeux et la spatialisation de l'information. Il permet de calculer, par tranches d'altitude de 300 m, pour 7 expositions et 3 degrés de pente, l'épaisseur de neige, l'équivalent en eau, la densité, la température, la taille et le type de grains, l'écoulement à la base du manteau et les flux d'énergie et de matière en surface et au sol. Ces sorties sont disponibles à Météo France depuis 1958.

Parmi toutes les sorties du modèle Crocus, nous utilisons en particulier l'EEN dans la suite de l'étude. Dans le cas du bassin du lac de l'Oule, nous utilisons les sorties d'EEN disponibles sur le massif SAFRAN de Haute-Bigorre.

De plus, Crocus étant réinitialisé le 1<sup>er</sup> août de chaque année, nous travaillons sur les années hydrologiques définies du 1<sup>er</sup> août d'une année civile au 31 juillet de l'année civile suivante. Afin de considérer une période d'archive concomitante avec les apports au lac de l'Oule fournis par la SHEM, nous utilisons les sorties Crocus sur la période allant du 01/08/1994 au 31/07/2013. Il convient de noter que les valeurs d'EEN fournis par Crocus sont des sorties modèles alimentées par les analyses Safrans, sans recalage par rapport à la moindre mesure d'enneigement.

#### III.2.2. Exploitation de l'EEN Crocus

Pour exploiter les sorties d'EEN Crocus à l'échelle du bassin du Lac de l'Oule, nous utilisons un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 100 m. Chaque pixel du MNT est rattaché à des tranches d'altitude, d'exposition et de pente, identiques à celles considérées par SAFRAN et Crocus. Les valeurs d'équivalent en eau (mm)

de chaque pixel du MNT sont ainsi fournies directement par Crocus à une date donnée. Il suffit ensuite d'intégrer les valeurs d'EEN sur l'ensemble des pixels du bassin pour passer d'une estimation de l'EEN sur chaque pixel à une estimation spatialisée du volume d'eau stocké sous forme de neige à l'échelle du bassin tout entier.

Deux modes d'utilisation de Crocus sont mis en œuvre :

- une estimation directe de l'EEN à chaque date  $t$ , notée  $EEN(t)$  ;
- une estimation d'une lame d'eau de fusion notée  $F$  par différence d'EEN entre 2 dates séparées d'une durée  $dt$  :  $F(t \text{ à } t+dt) = EEN(t+dt) - EEN(t)$  si  $EEN(t+dt) < EEN(t)$ , 0 sinon.

L'objectif de ces deux modes d'utilisation est bien entendu d'évaluer l'EEN à une date donnée mais également d'évaluer indirectement un volume d'apports susceptible d'être fourni par la fusion nivale entre deux dates successives.

## IV. VALIDATION DE L'EEN CROCUS POUR L'ESTIMATION DES APPORTS PAR FUSION NIVALE

### IV.1. Modélisation schématique du fonctionnement hydrologique du bassin versant du lac de l'Oule

Sur une période de temps entre 2 dates  $t_0$  et  $t$ , les apports observés à la retenue du lac de l'Oule peuvent être expliqués schématiquement par la fusion du manteau neigeux en place à la date  $t_0$  sur la période allant de  $t_0$  à  $t$  et par un volume lié aux précipitations totales à venir entre  $t_0$  et  $t$ . Entre ces 2 dates, les apports peuvent donc être estimés selon la décomposition suivante (figure 2) :

$$A(t) = A(t_0) + F[t_0 \rightarrow t] + P[t_0 \rightarrow t] \quad (1)$$

Avec  $A$  les apports cumulés (en mm),  $F$  la lame d'eau de fusion nivale issue du stock de neige en place à la date  $t_0$  et  $P$  des apports supplémentaires constatés entre les dates  $t$  et  $t_0$  correspondant aux précipitations liquides et à la fusion des précipitations solides tombées entre ces dates.

Pour obtenir un bilan d'apports totaux  $A$ , le terme  $P$  d'apports supplémentaires corrige certaines pertes qui pourraient avoir lieu à l'échelle de la période par évapotranspiration, par sublimation ou par stockage temporaire dans les dépressions situées en amont du lac de l'Oule. La faible variabilité des apports supplémentaires  $P$  repose sur les bonnes corrélations entre l'EEN Crocus et les apports observés.

Avant d'utiliser l'EEN fourni par Crocus en entrée d'une méthode de prévision des apports par fusion nivale, il est donc essentiel de contrôler et de valider les sorties d'EEN de Crocus sur le bassin de l'Oule. Des tests préliminaires réalisés en collaboration avec Météo France en 2011, par Huet (2011) et Dommanget (2011) ont permis de valider l'utilisation des sorties Crocus pour les besoins de notre étude. La validation est effectuée en 2 étapes : par rapport aux mesures d'enneigement à la perche à neige du Mont Pelat et par rapport aux apports SHEM reconstitués au Lac de l'Oule.

### IV.2. Validation de Crocus par rapport aux mesures d'enneigement à la perche du Mont Pelat

Les sorties d'EEN du modèle Crocus sont comparées aux mesures ponctuelles réalisées à la perche du Mont Pelat.

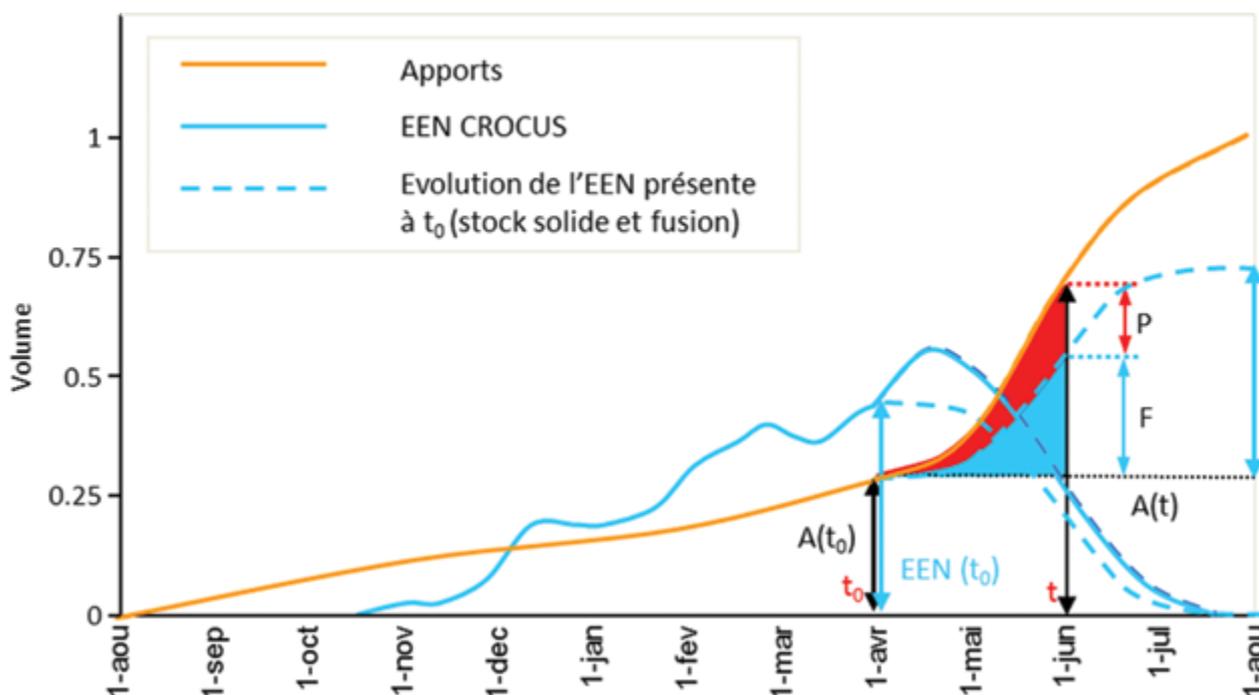


Figure 2 : Illustration de la décomposition simplifiée des apports (A) en une lame d'eau issue de la fusion nivale (F) d'un stock de neige présent initialement dont l'EEN est fourni par Crocus et d'un terme d'apports supplémentaires (P).

Crocus fournissant des valeurs d'EEN en fonction des données météorologiques du modèle SAFRAN et de la topologie d'une surface (exposition, pente, altitude), nous extrayons les valeurs d'EEN pour une parcelle similaire à celle où se situe la perche, en l'occurrence une zone plate à l'altitude 2100 m.

Les valeurs absolues d'équivalent en eau peuvent être très différentes, jusqu'à 50 % dans certains cas. Ces différences importantes en valeurs absolues ne sont pas étonnantes, les deux sources de données comparées étant de natures très

différentes : les perches à neige donnent une mesure ponctuelle de l'EEN, soumise aux effets locaux liés à l'emplacement spécifique de la perche, alors que les données Crocus représentent une moyenne spatiale sur une pente idéalisée isolée de toute influence locale.

Cependant, normaliser ces séries par rapport à leur moyenne interannuelle respective permet de réduire les écarts et d'améliorer significativement les corrélations (figure 3). Le coefficient de détermination  $R^2$  entre ces deux séries est en effet de 0.74, pour un seuil de

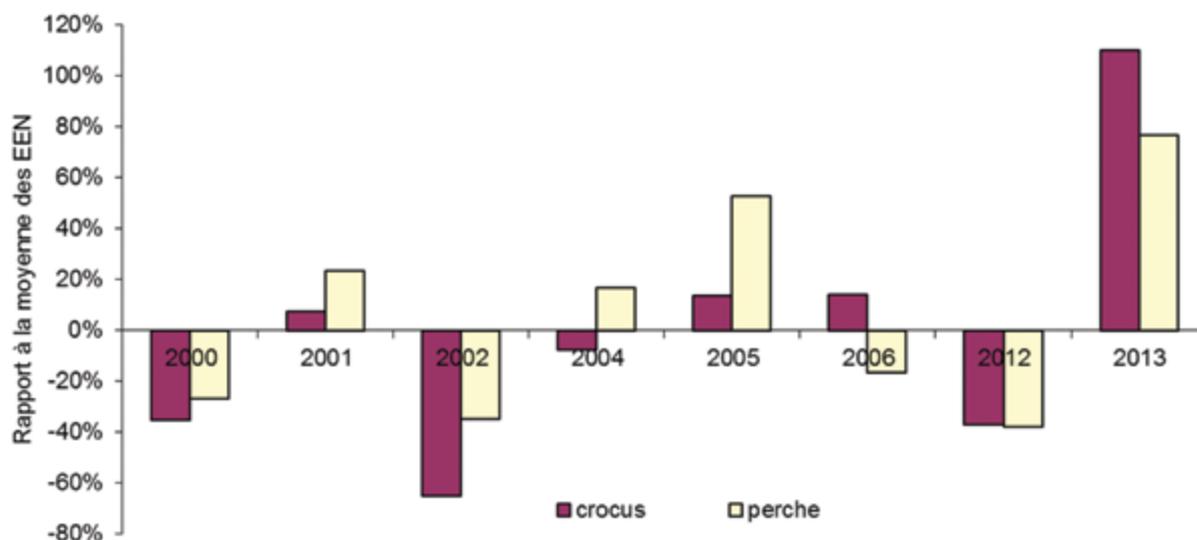


Figure 3 : Rapports à la moyenne des valeurs d'équivalent en eau au 1<sup>er</sup> février – comparaison des sorties Crocus avec les mesures au Mont Pelat ( $R^2 = 0.74$ ). Lorsque l'ensemble des données n'est pas disponible, les années ne sont pas indiquées sur le graphique.

signification de Bravais-Pearson à 0.5. Aucune tendance de biais systématique de Crocus par rapport aux perches n'est mise en évidence.

La figure 3 met également en évidence des écarts de Crocus par rapport aux mesures ponctuelles, pour les années où toutes les données sont disponibles. Ces écarts peuvent conduire à des surestimations ou des sous-estimations de l'EEN au cours de l'hiver, susceptibles d'engendrer eux-mêmes une surestimation ou une sous-estimation des apports en utilisant la formule (2). En complément de cette phase de validation, il est donc essentiel de contrôler la bonne corrélation entre les apports au lac de l'Oule et les sorties d'EEN Crocus.

### IV.3. Validation de Crocus par rapport aux apports reconstitués au Lac de l'Oule

Les sorties d'EEN Crocus intégrées sur le bassin du lac de l'Oule sont comparées aux apports au lac reconstitués à partir des données d'exploitation SHEM du lac. La comparaison est réalisée sur la période 1994-2010 selon les deux critères suivants :

- analyse de la corrélation entre le cumul des apports observés entre une date  $t$  et le 31 juillet et l'EEN estimé à cette date  $t$  par Crocus,
- analyse de la corrélation entre la distribution dans le temps des apports au lac et celles des lames d'eau de fusion déduites des variations d'EEN Crocus au pas de temps 15 jours.

Par exemple, pour l'année 2003 pour une date  $t$  fixée au 1<sup>er</sup> mars, on compare :

- les apports observés du 01/03/2003 au 31/07/2003 et l'EEN Crocus au 01/03/2003,
- les apports observés sur la période allant du 01/03/2003 au 15/03/2003 et la lame d'eau de fusion calculée à partir de l'écart entre les valeurs d'EEN fournies par Crocus au 01/03/2003 et au 15/03/2003.

Les résultats des comparaisons interannuelles sont synthétisés sur la figure 4.

Dans les deux cas, les corrélations sont significatives du 1<sup>er</sup> mars au 1<sup>er</sup> juin, avec des valeurs de coefficient de détermination comprises entre 0.25 et 0.7 pour un seuil de signification de Bravais-Pearson à 0.23. Les deux courbes présentent des évolutions similaires. Les corrélations sont les plus fortes entre le 1<sup>er</sup> avril et le 1<sup>er</sup> juin pour l'EEN et pour la fusion. Avant le mois d'avril, les estimations de l'EEN par Crocus sont moins bien corrélées avec les apports car les précipitations solides qui peuvent encore se produire au printemps ne sont pas prises en compte. Après le mois de juin, les précipitations sont essentiellement liquides. La neige éventuellement encore en place à cette période explique beaucoup moins les apports à venir.

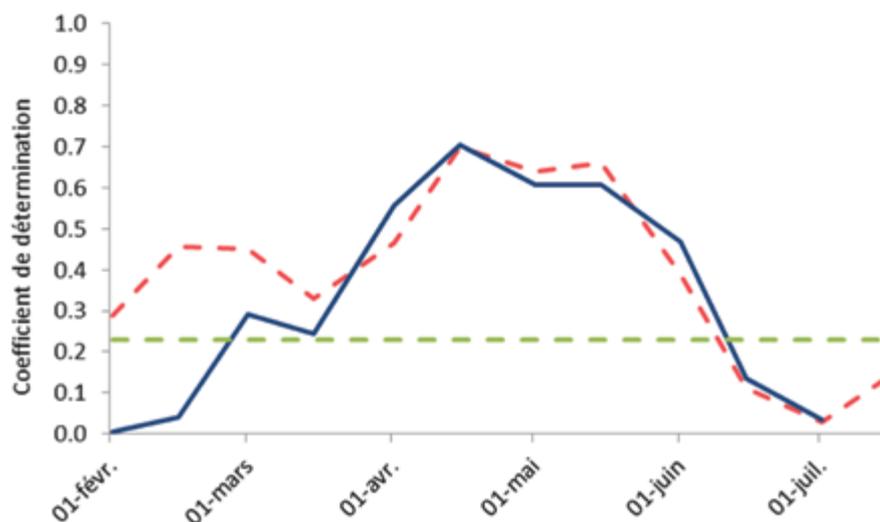
### IV.4. Conclusion sur l'utilisation de Crocus pour anticiper les apports par fusion nivale

Les résultats présentés dans ce chapitre confirment l'intérêt d'utiliser les sorties d'EEN Crocus pour reconstituer même de manière schématique les apports au lac de l'Oule. En effet, ils témoignent d'une part de la bonne corrélation entre les sorties d'EEN Crocus et les données de la perche du Mont Pelat (données normalisées par rapport à leurs moyennes respectives) et, d'autre part, de la bonne corrélation entre les apports observés au lac de l'Oule et les lames d'eau de fusion calculées à partir des sorties d'EEN Crocus du 1<sup>er</sup> mars au 1<sup>er</sup> juin. Les sorties d'EEN Crocus expliquent donc en partie les apports à venir.

La méthode présentée dans cet article vise deux objectifs pour la prévision des apports par fusion nivale :

- une estimation fiable et robuste du volume total d'apports entre la date de prévision et le 31 juillet ;
- une distribution correcte de ces apports dans le temps entre la date de prévision et le 31 juillet.

Les sorties d'EEN Crocus vont permettre d'initialiser le stock de neige en place à la date de prévision. Entre la date de prévision et le 31 juillet, le stock de neige et les apports vont évoluer en fonction des conditions de température et de précipitation. Dans le chapitre suivant, nous présentons



**Figure 4 :** Evolution selon la date  $t$  des coefficients de détermination  $R^2$  entre, d'une part, l'équivalent en eau de la neige estimée par le modèle Crocus et les apports cumulés entre la date  $t$  et le 31 juillet de l'année en cours (en rouge pointillés) et, d'autre part, entre les lames d'eau de fusion déduites des valeurs d'EEN et les apports pour chaque période de quinze jours (en bleu).

l'ensemble de la méthode développée ainsi que l'approche retenue pour simuler les conditions météorologiques entre la date de prévision et le 31 juillet.

## V. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE PRÉVISION DES APPORTS PAR FUSION NIVALE

Afin de développer la méthode de prévision des apports par fusion nivale, nous allons compléter la modélisation schématisée présentée au chapitre IV.1 de manière à simuler :

- les conditions météorologiques futures entre la date de prévision et le 31 juillet ;
- l'évolution du stock de neige en place sur le bassin naturel du lac de l'Oule entre la date de prévision et le 31 juillet compte tenu du stock de neige en place au début de la prévision et des conditions météorologiques futures.

Le stock de neige en place est initialisé à partir des sorties d'EEN Crocus. Une modélisation conceptuelle de type degré-jour permet ensuite de faire évoluer ce stock de neige entre la date de prévision et le 31 juillet en fonction des conditions de température et de précipitation futures. Les apports totaux au lac de l'Oule sont expliqués par les apports par fusion nivale, auxquels viennent s'ajouter les précipitations liquides entre la date de prévision et le 31 juillet.

La méthode vise à anticiper le remplissage de la retenue du lac de l'Oule entre la date de prévision et le 31 juillet pour améliorer la gestion de la ressource en eau et non à prévoir la date exacte des précipitations. De plus, la superficie du bassin du lac de l'Oule n'est que de 23,8 km<sup>2</sup>. Par conséquent, à l'échelle journalière, seule une fonction de production est nécessaire pour générer les apports. Aucune fonction de transfert n'est mise en œuvre. Les précipitations liquides contribuent directement aux apports au lac tandis que les précipitations solides contribuent à l'évolution du stock de neige en place.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons la modélisation degré-jour mise en œuvre ainsi que la méthodologie retenue pour simuler les conditions météorologiques futures.

### V.1. Modélisation conceptuelle de type degré-jour

#### V.1.1. Présentation de la modélisation degré-jour

- La méthode empirique dite du degré-jour revient à considérer :
- qu'il y a fusion du manteau neigeux à partir du moment où la température moyenne journalière de l'air  $T$  (en °C) dépasse une certaine valeur seuil de début de fusion  $T_0$ ,
  - et que lorsqu'il y a fusion, la lame d'eau journalière ponctuelle  $L_f$  produite par la fusion nivale est une fonction linéaire de l'écart entre  $T$  et  $T_0$ .

L'approche degré-jour se traduit donc mathématiquement par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \text{si } T \leq T_0 : & L_f = 0 \\ \text{si } T > T_0 : & L_f = k \cdot (T - T_0) \end{cases} \quad (2)$$

Cette formulation simple de la fusion correspond à une approximation au premier ordre du bilan d'énergie à la surface du manteau neigeux (Bontron, 2000). Cette approximation repose sur les deux hypothèses suivantes :

- l'albédo de la surface de la neige est supposé constant sur l'ensemble du bassin,

— la fusion est établie, c'est-à-dire que tout le manteau neigeux est à une température de 0°C.

Le coefficient de fonte  $k$  mis en œuvre dans la modélisation degré-jour tient compte des variations saisonnières de l'incidence du rayonnement solaire et du vieillissement de la neige. Ces deux effets sont modélisés respectivement sur la base d'une fluctuation sinusoïdale de  $k$  en fonction de la date de calcul et par l'application d'un facteur de vieillissement basé sur le cumul des degrés-jour depuis la dernière chute de neige (US Army Corps of Engineers North Pacific Div-Orege, 1956). Le coefficient de fusion s'écrit alors :

$$k = (k_{\text{moy}} + \sin(2\pi \cdot j/365 - \pi/2) \cdot \Delta k) \cdot (1 - \exp(-\Sigma DJ/\mu)) \quad (3)$$

avec  $k_{\text{moy}}$  la valeur moyenne de  $k$  (atteinte au printemps),  $\Delta k$  l'amplitude de variation de  $k$  qui permet d'avoir un coefficient maximal en été,  $j$  le jour julien de l'année,  $\Sigma DJ$  la somme des degrés-jour depuis la dernière chute de neige et  $\mu$  le coefficient de vieillissement.

L'équation de la modélisation degré-jour est locale. Afin de l'extrapoler sur l'ensemble du bassin versant du lac de l'Oule, il faut tenir compte des variations de la température et de l'enneigement en fonction de l'altitude. Pour cela, le bassin versant du lac de l'Oule est découpé en tranches d'altitude de 300 m sur la base des tranches d'altitudes définies dans SAFRAN et Crocus.

Pour la température, un gradient altitudinal constant et égal à 5,5°/1000m est appliqué aux données météorologiques de la station d'Eget. La température d'une tranche d'altitude correspond à la température de l'altitude médiane de la tranche d'altitude considérée. Les températures sont uniformes au sein d'une même tranche d'altitude mais varient d'une tranche d'altitude à l'autre.

Aucune correction des précipitations journalières en fonction de l'altitude n'est appliquée. En revanche, des coefficients de correction propres à chaque phase des précipitations sont mis en œuvre dans le modèle et permettent de compenser le déficit de précipitations observées à la station située dans la vallée par rapport à celles observées en altitude sur le bassin versant. Les taux de précipitations liquides et solides sont par ailleurs calculés linéairement en fonction de la température moyenne constatée le jour des précipitations et des températures seuil qui bornent le phénomène de précipitation mixte (Valery, 2010).

Le volume d'EEN présent initialement sur chaque tranche d'altitude est calculé à partir des sorties Crocus. Au sein de chaque tranche d'altitude, l'intégration des sorties Crocus est réalisée en fonction de l'exposition et de la pente (cf. III.2.2). La modélisation degré-jour est ensuite appliquée au pas de temps journalier. Pour chaque tranche d'altitude, le stock de neige du jour est calculé en fonction du stock estimé la veille, des précipitations solides et de la fusion calculée par la modélisation degré-jour.

A la fusion simulée par la modélisation degré-jour s'ajoutent des apports sous la forme d'une lame d'eau de fusion minimum dès lors que de la neige est présente sur le bassin. La lame d'eau de fusion minimum traduit le phénomène de fusion basale du manteau neigeux et permet d'avoir une production non nulle même par temps sec et froid.

Le modèle ainsi construit comporte 8 paramètres (notés au tableau 1).

#### V.1.2. Calage et validation de la modélisation degré-jour

La modélisation degré-jour est paramétrée et validée en validation croisée sur la base des données d'apports

Tableau 1 : Paramètres de la modélisation conceptuelle degré-jour.

Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs calage	Unités
Température de fusion $T_0$	0	-0.6	°C
Coefficient de fonte $k_{\text{moy}}$	1	0.6	mm.°C <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup>
Amplitude de la variation annuelle du coefficient de fonte $\Delta k$	0.75	0.6	mm.°C <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup>
Coefficient de vieillissement de la neige $\mu$	5	0.6	°C
Température moyenne de changement de phase de précipitation	1	1.5	°C
Coefficient correcteur des précipitations solides	1	3	
Coefficient correcteur des précipitations liquides	1	0.6	
Lame d'eau de fusion minimale	0	2.3	mm.j <sup>-1</sup>

reconstitués sur la période 1994-2010. Le calage est optimisé pour des calculs d'apports journaliers cumulés jusqu'au 31 juillet à partir de 6 dates de prévision différentes. Les 6 dates de prévision considérées sont : 1<sup>er</sup> février, 1<sup>er</sup> mars, 1<sup>er</sup> avril, 1<sup>er</sup> mai, 1<sup>er</sup> juin et 1<sup>er</sup> juillet.

La modélisation degré-jour est initialisée à partir des sorties d'EEN Crocus estimées à chaque date de prévision. Les données météorologiques relevées quotidiennement à la station d'Eget sont ensuite utilisées sur toute la période de prévision comme expliqué au paragraphe V.1.1.

Pour comparer les résultats de la modélisation avec les apports observés, le critère de la moyenne quadratique de l'erreur (RMSE) est utilisé :

$$\text{RMSE} = \sqrt{E((X - Y)^2)} \quad (4)$$

avec X les valeurs d'apports modélisés et Y les apports observés. Ce score est standardisé par rapport au volume cumulé d'apports à la fin de la période. Il est alors noté %RMSE.

L'algorithme de calage optimise un jeu de paramètres initiaux issus de la littérature et présentés dans le tableau 1 pour minimiser le score %RMSE. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 2. La valeur du coefficient de fonte est faible par rapport à la littérature (He, *et al.*, 2014). Cela s'explique par l'utilisation d'une lame d'eau de fusion minimale qui permet de compenser cette faible valeur. De la même manière, les coefficients de correction des précipitations compensent l'éloignement du pluviomètre par rapport au bassin versant.

## V.2. Méthode de prévision des apports par fusion nivale

Souhaitant se projeter bien au-delà de l'horizon de prévision météorologique, il est nécessaire de se tourner vers une prévision de nature probabiliste. Elle se base sur une estimation déterministe de l'état du stock neigeux en place au moment de la prévision, mais considère un ensemble d'évolutions possibles de ce stock et donc des chroniques d'apports, en se basant sur la construction de chroniques de températures et de précipitations. A chaque couple de chroniques de températures et de précipitations généré correspond une estimation des apports issue de la modélisation degré-jour ; toutes les simulations d'apports étant conditionnées par le même stock initial de neige.

Pratiquement, la méthode de prévision des apports par fusion nivale s'appuie sur :

- la modélisation degré-jour décrite et calée au paragraphe V.1 ;
- la valeur de l'EEN Crocus à la date de prévision  $t_0$ . Cette valeur d'EEN permet d'initialiser le stock de neige en place dont l'évolution entre  $t_0$  et le 31 juillet sera traitée par la modélisation degré-jour ;
- des chroniques météorologiques fictives de précipitations et de températures journalières construites par tirage stochastique à l'intérieur de chroniques observées passées. Ce tirage stochastique est contraint par des prévisions saisonnières de tendances sur les précipitations et les températures mensuelles, fournies par les prévisionnistes de CNR. Ces chroniques météorologiques fictives permettent de simuler l'évolution du stock de neige en place entre  $t_0$  et le 31 juillet en tenant compte de différents scénarios de températures et des précipitations liquides et solides susceptibles de se produire entre  $t_0$  et le 31 juillet.

Tous les 15 jours lors de la réalisation des prévisions d'apports pour la SHEM, les prévisionnistes de CNR analysent les tendances saisonnières de précipitations et températures à l'horizon de quelques mois. Les chroniques de températures et de précipitations générées stochastiquement tiennent compte de ces tendances. Pour cela, un échantillon de données de températures et de précipitations est sélectionné dans tout l'historique disponible mois par mois, en écartant pour chaque mois les années les plus éloignées de la tendance prévue. Cinq tendances sont définies pour chaque grandeur météorologique : « très inférieur à la normale », « inférieur à la normale », « autour de la normale », « supérieur à la normale » et « très supérieur à la normale ». A ces 5 tendances s'ajoutent 3 niveaux de fiabilité de la prévision saisonnière (très fiable, fiable et peu fiable). La fiabilité permet d'écartier une partie plus ou moins importante de l'échantillon lors des tirs stochastiques. La taille de l'échantillon écarté est calée pour respecter les intervalles de confiance liés à l'aléa climatique. Ainsi, pour une tendance très fiable, un tiers des données est retiré. Seulement un sixième des données est retiré pour une tendance fiable. L'intégralité de l'échantillon est conservée dans le cas d'une prévision jugée « peu fiable » ce qui revient à ne pas tenir compte des tendances saisonnières dans les simulations.

Une fois l'échantillon de données observées sélectionné, 100 tirs stochastiques sont effectués pour générer 100 chroniques météorologiques fictives. Chaque tirage retient pour chaque mois une chronique de température et

une chronique de précipitation issues de la même année. Le choix d’effectuer 100 tirages correspond à un compromis entre rapidité des calculs et robustesse de la variabilité des chroniques générées.

Enfin, pour prendre en compte l’incertitude intrinsèque de la modélisation degré-jour utilisée, chacune des 100 simulations est assortie d’un intervalle de confiance reflétant les erreurs observées lors du calage de la modélisation degré-jour. Les résultats de la prévision d’apports, exprimés par une distribution statistique à chaque temps  $t$  entre  $t_0$  et le 31 Juillet, sont ainsi plus dispersés. Mais les quantiles de prévision annoncés ne sont pas biaisés et peuvent être utilisés dans une optique de gestion de risque.

Pour évaluer la qualité des prévisions, le score CRPS (Continuous Ranked Probability Score) est utilisé (Hersbach, 2000). Le CRPS permet de comparer la fiabilité des prévisions (justesse et finesse) par rapport à la valeur observée. Il est défini de la façon suivante :

$$CRPS = \int_{-\infty}^{+\infty} [P(x) - P_o(x)]^2 dx \quad (5)$$

avec la probabilité de non dépassement et où est la valeur de réellement observée. Un score proche de zéro traduit ainsi une prévision probabiliste juste et fine.

## VI. PERFORMANCES DE LA MÉTHODE DE PRÉVISION

La méthode est calée sur la période 1994-2010. Les performances sont évaluées sur les hivers 2012 et 2013.

### VI.1. Des hivers 2012 et 2013 très contrastés dans les Pyrénées

L’hiver 2012 a été sec dans les Pyrénées, avec un enneigement au 1<sup>er</sup> avril bien inférieur à la normale. Au cours du printemps, le temps est resté variable, avec des périodes

humides au début puis sèches dès mi-juin et n’a pas permis de constituer un manteau neigeux important.

A l’inverse l’année 2013 a été largement excédentaire pour l’enneigement comme pour les apports. Un stock nival exceptionnel s’est constitué jusqu’au mois d’avril. Il a ensuite fondu très rapidement à partir de mi-juin lors d’un épisode de fortes chaleurs associées à des précipitations intenses.

Ces 2 hivers très contrastés permettent de valider la méthode de prévision des apports dans des contextes différents mais tout aussi importants l’un que l’autre pour le gestionnaire : anticipation d’une période sèche avec risque de ne pas satisfaire les besoins agricoles en 2012, puis anticipation de forts apports au début de l’été et gestion du risque de déversement en 2013.

### VI.2. Résultats obtenus en reconstitution des apports

Dans ce paragraphe, il s’agit d’évaluer les performances de la modélisation degré-jour en reconstitution des apports observés à partir des données météorologiques observées et des estimations d’EEN Crocus disponibles pour chaque date de simulation. Les résultats sont comparés aux performances obtenues en calage sur la période 1994-2010 pour les mêmes dates de reconstitution.

La figure 5 illustre les reconstitutions de la période avril-juillet des années 2012 et 2013 par rapport aux apports observés. En 2012, les reconstitutions aux 3 dates considérées permettent d’évaluer le volume d’apports observés avec une erreur de -4 % à +19 %. Comme l’année est plutôt déficitaire en neige, l’EEN Crocus au 1<sup>er</sup> mai est sans doute surestimé ce qui conduit à une surestimation des apports totaux. Ce sont donc les reconstitutions des 1<sup>er</sup> mars et 1<sup>er</sup> avril qui fournissent les meilleurs résultats. Néanmoins, la reconstitution temporelle des apports de la saison de fonte 2012 est bonne pour les 3 dates.

En 2013, les apports sont très excédentaires. Les reconstitutions aux 3 dates considérées sous-estiment les apports totaux mais permettent de les évaluer avec une précision de 5 à 11 %. Les 3 reconstitutions sont en retard dans le

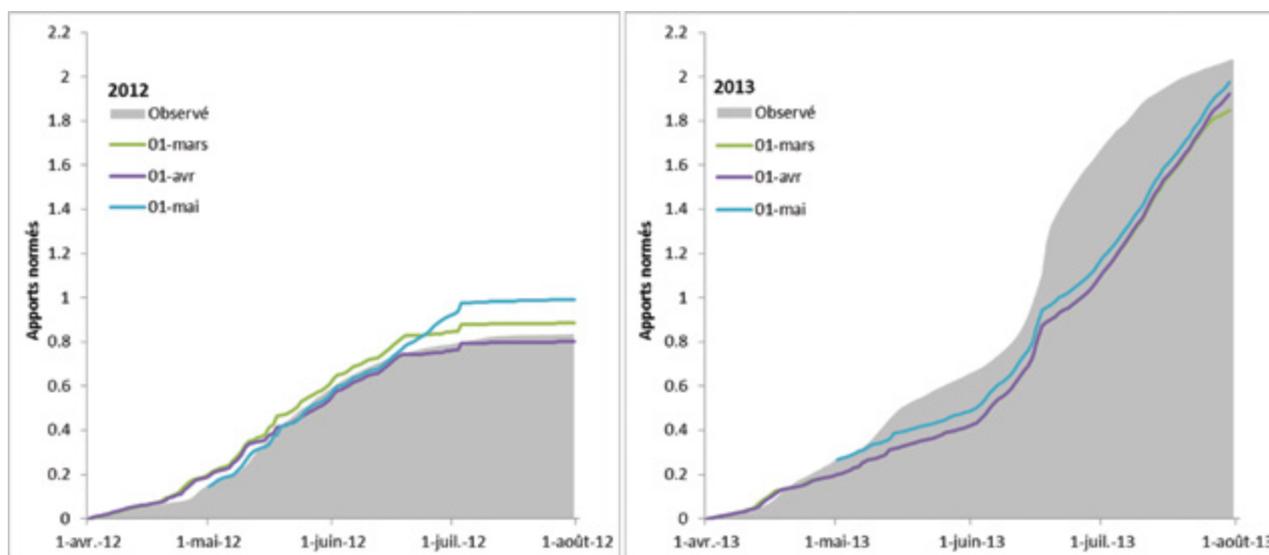


Figure 5 : Reconstitution des apports au lac de l’Oule pour les années 2012 et 2013 par la modélisation degré-jour avec les données météorologique observées. Les apports sont normés par rapport à une valeur arbitraire, par souci de confidentialité.

Tableau 2 : Scores %RMSE à 3 dates différentes, en moyenne sur la période de calage et sur les années 2012 et 2013.

Date de début	Calage (1994-2010)	2012	2013
1 <sup>er</sup> mars	9.3 %	10.7 %	11.3 %
1 <sup>er</sup> avril	10.1 %	4.3 %	15.8 %
1 <sup>er</sup> mai	14.5 %	12.0 %	17.3 %

déroulement des apports. En particulier, elles sous-estiment l'impact sur les apports de l'épisode météorologique exceptionnel de mi-juin 2013 (fortes chaleurs et pluies intenses), la modélisation degré-jour mise en place n'étant pas adaptée pour simuler ces événements exceptionnels (Obled & Rosse, 1975).

Pour quantifier les résultats, les valeurs de score %RMSE sont présentées au tableau 2. Les valeurs obtenues confirment la qualité des reconstitutions. Elles mettent également en évidence que les scores obtenus sur les années 2012 et 2013 ne sont pas dégradés par rapport à la période 1994-2010.

### VI.3. Résultats obtenus en prévision

Les graphiques de la figure 6 présentent les performances de la méthode de prévision des apports cumulés du 1<sup>er</sup> mars, 1<sup>er</sup> avril et 1<sup>er</sup> mai jusqu'au 31 juillet. Le tableau 3 indique les valeurs obtenues pour le score CRPS.

Dans cette partie, les chroniques météorologiques sont générées stochastiquement en tenant compte des tendances météorologiques observées. Les résultats sont fournis sous la forme d'une prévision médiane encadrée par un intervalle de confiance à 80 %.

Pour les années 2012 et 2013, et par rapport à un modèle simple fondé sur la distribution statistique des apports observés sur la période considérée (climatologie), la méthode développée permet d'améliorer les valeurs du score CRPS dans un rapport de 1 à 5.

Le tableau 3 et la figure 6 mettent également en évidence l'intérêt de prévoir les tendances saisonnières. En 2012, les tendances saisonnières contribuent à améliorer jusqu'à 25 % la valeur du score CRPS. En 2013, les tendances n'apportent pas d'information. D'une façon générale, la prise en compte des tendances saisonnières apporte d'autant plus à la prévision que la prévision est réalisée tôt dans la saison, ou tard après la fonte. En effet, les tendances apportent de l'information de manière complémentaire à la donnée d'EEN (figure 4), lorsque la part des précipitations futures dans les apports cumulés finaux est importante par rapport à la part expliquée par le stock de neige déjà en place. Or 2013

est une année fortement excédentaire pour l'enneigement comme pour les apports.

## VII. CONCLUSION

La gestion de la ressource en eau dans les zones de montagne est un enjeu majeur pour les producteurs d'énergie hydroélectrique. L'estimation de l'eau stockée dans le manteau neigeux et libérée lors des périodes de fonte est donc une question stratégique.

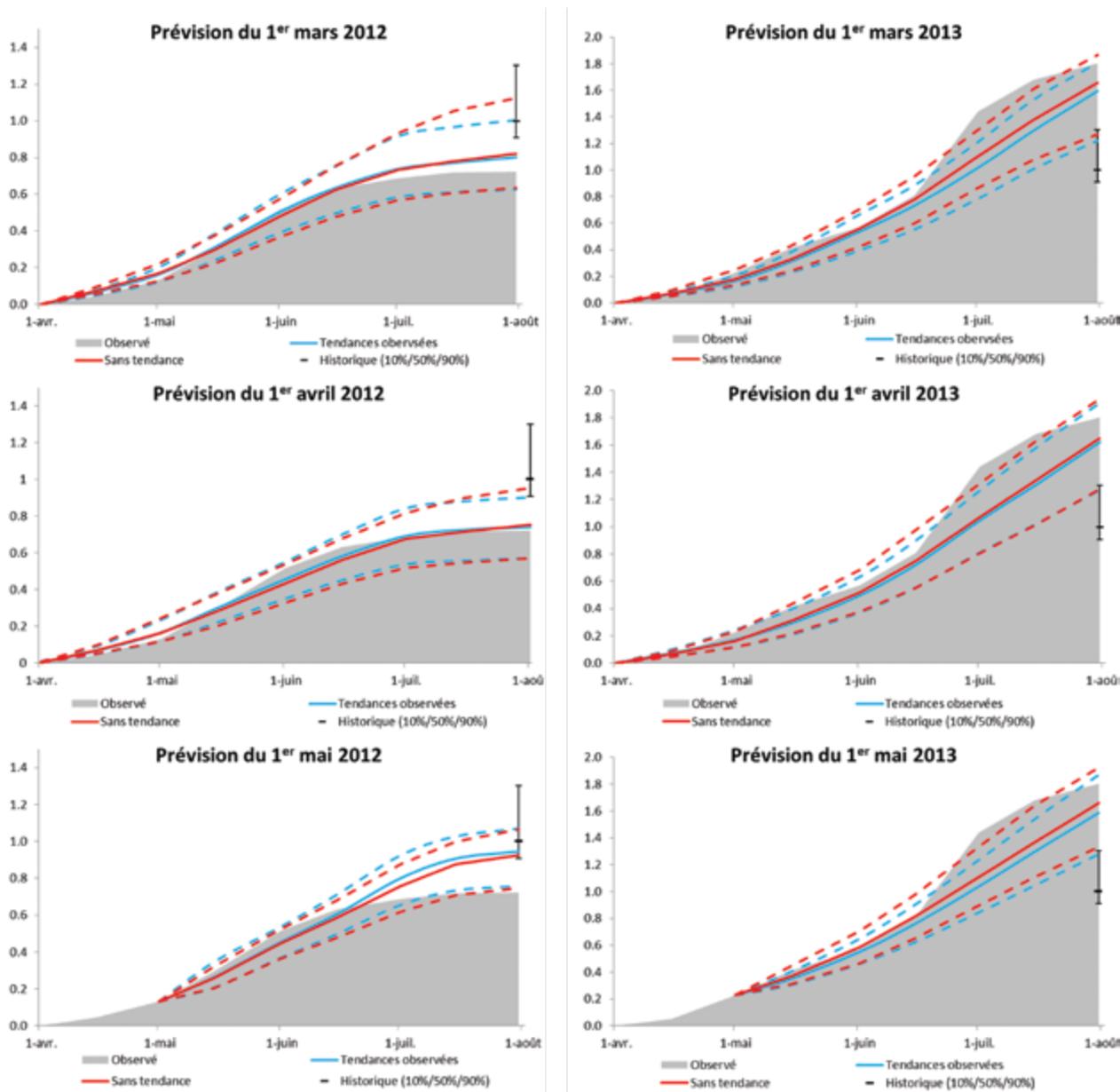
Pour répondre à ce besoin, CNR a développé pour le compte de la SHEM une méthode de prévision des apports par fusion nivale. A partir de chroniques météorologiques générées stochastiquement sur la base des chroniques météorologiques observées, cette méthode permet de simuler les apports au lac de l'Oule. Elle s'appuie sur une modélisation degré-jour de l'évolution du stock de neige en place au cours de la saison de fonte. Le stock de neige en place à la date de prévision est initialisé à partir des sorties d'EEN fournies par le modèle Météo France Crocus. Il est également possible de tenir compte dans la méthode des tendances saisonnières prévues pour les mois à venir.

Cette méthode est utilisée en opérationnel depuis 2012. Elle permet à la SHEM d'optimiser la gestion du remplissage du barrage du lac de l'Oule au cours de la saison de fonte et de planifier les opérations de maintenance en fonction des prévisions d'apports. Ainsi, en 2012, les exploitants de la SHEM ont maîtrisé la production hydroélectrique pour préserver le niveau haut de la retenue pour l'été compte tenu de l'enneigement relativement faible constaté au cours de l'hiver. A l'inverse, au cours de l'hiver et du printemps excédentaires de 2013, les exploitants ont anticipé et accru les programmes de production pour creuser les retenues de manière préventive et limiter les déversements en fin de saison de fonte.

Chaque nouvelle saison de prévision fait l'objet d'une analyse des performances obtenues de manière à améliorer chaque année les performances des prévisions. Les développements à venir visent à associer une fonction de transfert à la fonction de production degré-jour déjà mise en œuvre

Tableau 3 : Scores CRPS des apports prévus du 1<sup>er</sup> avril au 31 juillet par rapport aux apports observés pour 3 dates de prévision et pour la distribution statistique des données observées (« historique »).

Cumuls des apports du 1 <sup>er</sup> avril au 31 juillet	Climatologie	1 <sup>er</sup> mars		1 <sup>er</sup> avril		1 <sup>er</sup> mai	
		Sans tendance	Tendances observées	Sans tendance	Tendances observées	Sans tendance	Tendances observées
CRPS 2012	5.04	1.56	1.19	0.80	0.67	2.54	2.30
CRPS 2013	12.07	1.96	2.20	1.95	2.20	1.64	1.84



**Figure 6 :** Prévisions des apports normalisés par rapport à une valeur arbitraire, sur le bassin du lac de l’Oule en 2012 et 2013, sans prise en compte des tendances saisonnières (courbes rouge), et avec prise en compte des tendances saisonnières (courbes bleues). Les apports sont normés par rapport à une valeur arbitraire, par soucis de confidentialité.

pour adapter la méthode à des bassins versants plus grands. En parallèle, des recherches complémentaires sont en cours pour fiabiliser l’estimation de l’EEN à partir des sorties Crocus par rapport aux données d’enneigement disponibles. Enfin, et compte tenu de la plus-value apportée par la prévision des tendances saisonnières, des études seront menées pour améliorer les modèles sur les premières semaines suivant la date de prévision grâce à des prévisions météorologiques à moyen terme (15 jours).

**VIII. REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier les agents de la SHEM pour leur aide et la fourniture des données d’exploitation. Ils

souhaitent également remercier Météo France et plus particulièrement Sophie Martinoni pour l’appui apporté lors des premiers développements méthodologiques en 2011.

**IX. RÉFÉRENCES**

BONTRON (2000) — Elaboration d’un modèle conceptuel d’écoulements nivo-glaciaires journaliers appliqué au bassin supérieur de la Sarennes : utilisation d’une approche degré jour dans un contexte pauvre en données climatologiques. *Rapport de DES. Cemagref*

BRUN E., DAVID P., BRUNOT G. & SUDUL P. (1992) — A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Of Glaciol.* **38** 128

- BRUN E., DAVID P. & SUDUL M. (1989) — An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Of Glaciol.* **35** 121
- CNRM, OCT. (2013) — //www.cnrm.meteo.fr - présentation de Crocus et chaîne SCM avec références bibliographiques. [En ligne -Acces Le Oct. 2013].]
- CORPS OF ENG., N. P. D. (1956) — *Snow hydrology, 1956: Summary report of the snow investigation.* Portland, Oregon: s.n
- DOMMANGET E. (2011) — *Rapport de TFE - Développement et optimisation de modèles de prévision des apports par fusion nivale.* Lyon: Ecole Centrale de Lyon - CNR
- DURAND Y. ET AL. (1993) — *A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, s.n*
- HERSBACH H. (2000) — Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems. *Weather and Forecasting.* **15** 559-570
- HE Z., PARAJKA J., TIAN F. & BLÖSCHL G. (2014) — Estimating degree-day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling. *Hydrology and Earth System Sciences.* **18**
- HUET G. (2011) — *Rapport stage de fin d'étude, s.l.: INSA Lyon, Météo France*
- OBLÉD C. & ROSSE B. (1975) — Modèles mathématiques de la fusion nivale en un point. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologique.* **XII(4)** 235
- PAQUET E. (2004) — Evolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nivale à différentes altitudes. *La Houille blanche.* **2** 75-82
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS NORTH PACIFIC DIV-OREGO (1956) — *Snow hydrology, 1956: Summary report of the snow investigation.* Portland, Oregon
- VALÉRY (2010) — Modélisation précipitations-débit sous influence nivale Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. *Thèse de doctorat ParisTech*