



HAL
open science

Peut-on étendre l'échéance de prévision des crues en optimisant la prévision de pluies par recherche d'analogues? Application au bassin de la Seine à Paris

A. Ben Daoud, Eric Sauquet, M. Lang, Maria-Helena Ramos

► To cite this version:

A. Ben Daoud, Eric Sauquet, M. Lang, Maria-Helena Ramos. Peut-on étendre l'échéance de prévision des crues en optimisant la prévision de pluies par recherche d'analogues? Application au bassin de la Seine à Paris. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2011, 1 (1), pp.37-43. 10.1051/lhb/2011004 . hal-01098303

HAL Id: hal-01098303

<https://hal.science/hal-01098303>

Submitted on 7 Jan 2015

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

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

Peut-on étendre l'échéance de prévision des crues en optimisant la prévision de pluies par recherche d'analogues ? Application au bassin de la Seine à Paris

Aurélien BEN DAOUD¹, Eric SAUQUET², Michel LANG², Maria-Helena RAMOS³

¹ Compagnie Nationale du Rhône – Direction de l'Energie – Gestion de l'Energie – 2 rue André Bonin – 69316 Lyon Ced 04, e-mail : a.bendaoud@cnr.tm.fr

² Cemagref – Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique – 3 bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon, Cedex 9, France, e-mail : eric.sauquet@cemagref.fr

³ Cemagref – Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés – Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex, e-mail : maria-helena.ramos@cemagref.fr

RÉSUMÉ. – Cette étude présente une application de la méthode de prévision des pluies par recherche d'analogues à la prévision des crues sur le bassin de la Seine à Paris. Cette technique consiste, à partir d'une situation météorologique cible, à rechercher dans une archive les situations passées les plus similaires puis à extraire les précipitations associées. Ceci permet d'estimer de manière probabiliste les précipitations attendues pour ce jour cible. La prévision des précipitations a été réalisée, pour des échéances allant de 1 à 8 jours, à partir d'une sélection de situations analogues en deux niveaux (méthode A : champs de pression et humidité), et quatre niveaux (méthode B : en rajoutant température et vitesse verticale). Ces prévisions ont ensuite été exploitées par le modèle hydrologique GR3P pour produire des prévisions probabilistes de débits. Les performances des deux approches ont été évaluées en contexte de prévision parfaite (situations cibles extraites de réanalyses) et de prévision opérationnelle (situations prévues par un modèle météorologique). Dans le premier cas, la méthode B s'avère plus performante, en réduisant fortement les incertitudes de prévision ainsi que le taux de fausses alertes. En conditions opérationnelles, le gain de la méthode B n'est perceptible que sur les deux premières échéances ($J+1$ et $J+2$). Cette étude de cas montre qu'il est possible d'élargir les échéances de prévision des crues, et de mettre à disposition des services opérationnels des outils permettant d'anticiper un événement de crue jusqu'à une semaine à l'avance.

Mots-clés : Prévision probabiliste, approche par analogie, adaptation statistique, modélisation pluie-débit, prévision de crues

Can we extend flood forecasting lead-time by optimising precipitation forecasting based on analogs ? Application to the Seine river basin

ABSTRACT. – This study presents the application of a precipitation forecasting technique based on analogs to forecast discharges at the Seine river basin. Given a target meteorological situation, the analog approach aims at searching in a meteorological archive a sample of past situations that are similar to the target one. From this sample, it is possible to extract the associated precipitation amounts, and then provide a probabilistic estimation of the expected daily rainfall. Precipitation forecasts were obtained up to eight days in advance through a selection of analogs based on two levels of analogy (method A : pressure fields and humidity) and four levels of analogy (method B : by adding temperature and vertical velocity). These forecasts were introduced in the hydrological model GR3P to derive probabilistic discharge forecasts. Performances were evaluated in a perfect prognosis context (target situation comes from a meteorological reanalysis) and in an operational forecasting context (target situation comes from weather forecasts). Results show a significant improvement of precipitation forecasts when method B is used, with reduced uncertainties and lower false alarm rates. In an operational forecasting context, the highest gain obtained by method B is observed during the two first days of lead-time. Flood cases were studied and results show that it is possible to anticipate a flood event up to one week ahead. The approach here proposed can contribute to the methods currently used by operational flood forecasting services, by providing quantitative precipitation forecasts for longer lead-times.

Key-words : Probabilistic forecasting, analog approach, statistical adaptation, rainfall-runoff modeling, flood forecasting

I. INTRODUCTION

Une des attentes fréquemment exprimées par les services opérationnels de prévision des crues est de disposer de prévisions de précipitations fiables, assorties de leurs incertitudes, et pour des échéances pouvant aller au-delà de quelques jours. Différentes méthodes de prévision de type probabiliste peuvent répondre à ces besoins, dont deux sont

plus fréquemment évoquées : i) la prévision météorologique d'ensemble [1], [2] et ii) la prévision probabiliste de précipitations issues de la recherche d'analogues [3], [4]. Utilisées en entrée de modèles hydrologiques, ces méthodes permettent de disposer de prévisions probabilistes de débits et de contribuer à une meilleure anticipation du risque des crues.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'apport des approches basées sur la recherche de situations analogues pour la

prévision de débits de crues à moyenne échéance (> 3 jours). Le cas d'application est celui du bassin de la Seine à Paris, qui a été divisé en cinq sous-bassins (Figure 1) : le Loing à Episy (Loing-E), la Marne à La Ferté (Marne-F), la Seine à Bazoches (Seine-B), l'Yonne à Courlon (Yonne-C) et la Seine Intermédiaire (Seine-Int).

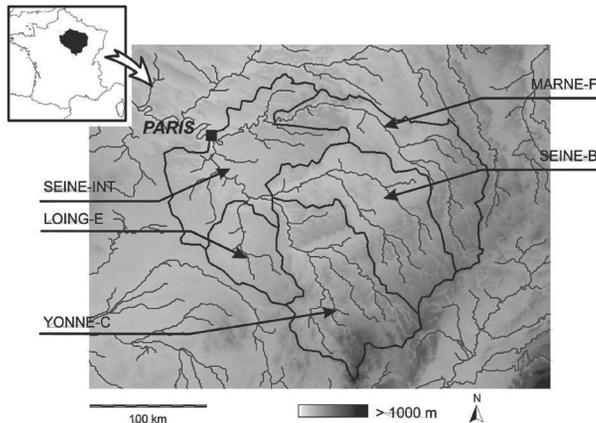


Figure 1 : Localisation géographique des cinq sous-bassins versants de la Seine, avec indication du réseau hydrographique et de la topographie.

II. OUTILS

II.1. Méthodes de prévision des pluies par analogie

La méthode de prévision des précipitations par analogie [5] est fondée sur l'hypothèse suivant laquelle deux situations météorologiques analogues doivent engendrer des effets locaux du même ordre [6]. A partir de la caractérisation d'une situation météorologique cible prévue par un modèle numérique de prévision du temps (MNP), l'objectif est de rechercher dans une archive météorologique les situations passées les plus similaires, puis d'extraire d'une archive pluviométrique les cumuls de précipitations associés. Pour chaque échéance de prévision, nous pouvons alors construire une distribution statistique empirique des pluies possibles sur notre zone d'intérêt.

La méthode de référence (méthode *A*) est utilisée de façon opérationnelle par la Compagnie Nationale du Rhône. Elle est basée [7] sur la sélection, pour un jour cible donné, de situations analogues en deux niveaux : au niveau 1 sont retenues les $N1$ situations les plus similaires à la situation cible en termes de circulation générale à échelle synoptique ; puis au niveau 2 les $N2$ situations les plus proches en termes d'hygrométrie à échelle cette fois très locale. Les situations candidates au niveau 1 doivent répondre à une contrainte calendaire (incluses dans une fenêtre temporelle de plus ou moins deux mois autour du jour cible).

La recherche de situations analogues a été améliorée par Ben Daoud [8] (méthode *B*), en introduisant deux niveaux complémentaires d'analogie. Le premier résulte du constat que la contrainte calendaire (± 2 mois) conduit dans certains cas à ne pas retenir des situations intéressantes. Cette contrainte a été remplacée par un niveau préliminaire de pré-sélection des situations candidates basé sur le champ des températures. Puis un niveau de sélection intermédiaire a été introduit entre les deux niveaux 1 et 2. Il permet de retenir, parmi les $N1$ situations analogues à échelle synoptique, les situations dont le champ de vitesse verticale à échelle locale

est similaire à celui prévu pour le jour cible. Par ailleurs, la sélection des $N2$ situations analogues en termes d'hygrométrie a été étoffée en raisonnant sur l'humidité relative aux niveaux de pression 925 hPa et 700 hPa, au lieu du seul niveau 850 hPa dans la méthode *A*.

II.2. Génération de prévisions probabilistes de débit

Nous avons choisi de conserver l'aspect probabiliste des prévisions de pluies jusqu'aux débits. L'objectif final est donc d'établir, comme pour les précipitations, une distribution statistique empirique des débits prévus. La difficulté de générer des scénarios probabilistes de débits, à partir des prévisions issues d'une méthode d'analogie par adaptation statistique, réside dans la construction de scénarios cohérents dans le temps pour les échéances désirées. En effet, contrairement à la prévision statistique simple [6], où l'analogie est uniquement recherchée sur la situation observée le jour courant et les situations analogues retenues fournissent des séquences temporelles, en adaptation statistique les situations analogues retenues chaque jour sont indépendantes dans le temps, puisque les sorties d'un MNP sont adaptées pour chaque échéance.

Afin de remédier à ce problème, nous avons mis en place une méthode alternative basée sur la construction de N scénarios, obtenus en tirant aléatoirement, à chaque échéance de prévision (J à $J+7$), la pluie associée à une des N situations analogues retenues. Nous disposons ainsi, pour chaque jour de prévision, de N scénarios de précipitations *a priori* représentatifs des distributions issues des analogues. Les scénarios d'évolution temporelle de pluies prévues sont ensuite injectés dans un modèle hydrologique et des distributions empiriques de débits prévus sont établies par examen statistique des débits générés pour chaque échéance. La procédure de génération des scénarios de débit est schématisée sur la Figure 2. Nous avons retenu le modèle hydrologique GR3P, modèle conceptuel global à réservoirs à 3 paramètres [9], [10]. Il est ici utilisé au pas de temps journalier et avec mise à jour des états du réservoir de routage.

II.3. Critères d'évaluation des prévisions

II.3.1. Score CRPSS

Nous avons repris le score *CRPS* (Continuous Ranked Probability Score) utilisé par Bontron [7], qui permet de mesurer l'écart entre la distribution des valeurs prévues et la valeur observée, en distinguant la finesse (dispersion) et la justesse (écart entre valeur médiane et observation). Une valeur moyenne du score peut être calculée pour une série d'observations et de prévisions associées. Les résultats sont exprimés de façon relative à une prévision de référence, en utilisant le score adimensionnel *CRPSS* (Continuous Ranked Probability Skill Score) [11]. Le score *CRPSS* est égal à 1 pour une prévision parfaite, à 0 pour une prévision équivalente à la prévision de référence, et il est négatif pour une prévision moins bonne que la prévision de référence. Dans le cadre de cette étude, la prévision de référence est constituée de la climatologie pour les pluies (fonction de répartition des pluies de bassin), et d'une prévision basée sur la persistance pour les débits (débit prévu du jour $J+1$ égal au débit observé du jour J).

II.3.2. Scores POD et FAR

Pour évaluer la capacité des méthodes de prévision à correctement annoncer le dépassement (respectivement non-

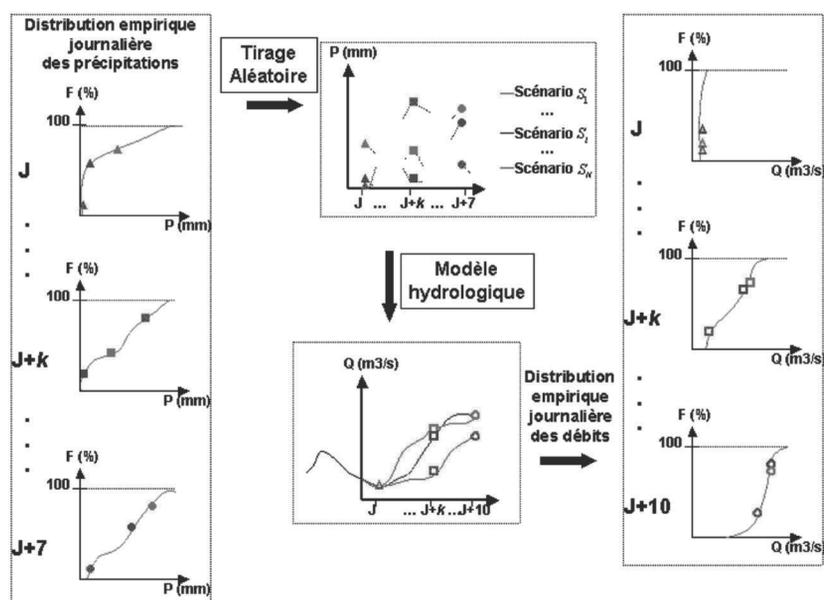


Figure 2 : Procédure schématisée de la génération de N scénarios de débits pour les échéances J à $J+10$, à partir des distributions empiriques journalières des précipitations issues de la méthode d'analogie.

dépassement) d'un seuil d'alerte S (de pluie ou de débit), il est possible d'établir un tableau de contingence basé sur le nombre d'événements correctement (ou pas) prévus, à partir duquel des scores catégoriques peuvent être calculés. Les scores que nous avons retenus sont le score POD (Probability Of Detection) et le score FAR (False Alarm Rate). Le premier donne la probabilité que le seuil S soit dépassé par une lame d'eau (ou un débit) prévue, sachant que la lame d'eau (ou le débit) observée dépasse effectivement ce seuil. Le second score donne la probabilité, lorsque le seuil S est dépassé par une lame d'eau (ou un débit) prévue, que la lame d'eau (ou le débit) observée ne dépasse pas ce seuil. La valeur de ces deux scores est comprise entre 0 et 1, la valeur du score parfait étant 1 pour le score POD , et 0 pour le score FAR .

Dans le cas d'une prévision probabiliste, il est également nécessaire de choisir une valeur de prévision (ou de probabilité) parmi l'ensemble des valeurs d'une distribution prévue. Pour les pluies, nous avons retenu pour cette étude le quantile 60 % (asymétrie de la distribution liée à l'effectif des pluies nulles). Pour les débits, nous retenons le quantile 90 % de la distribution des débits prévus pour augmenter les chances de détecter des événements de crue. Les scores POD et FAR ont été évalués pour différents seuils de pluie et de débit, correspondant aux quantiles d'ordre 10 à 90 % par pas de 10 % (Q_{10} à Q_{90}), ainsi que les quantiles d'ordre 95 et 99 % (Q_{95} et Q_{99}) de la fonction de répartition obtenue sur la période de disponibilité des données. Pour les pluies, seuls les cumuls non nuls sur l'ensemble des sous-bassins ont été considérés pour la fonction de répartition. En outre, le seuil pluie/non pluie (0 mm) a également été étudié.

II.4. Contextes d'élaboration d'une prévision des pluies et données utilisées

Dans un premier temps, nous nous placerons dans un contexte de *prévision parfaite*, afin que les résultats ne soient pas influencés par les erreurs de prévision des variables d'analogie, *i.e.* les méthodes seront appliquées à partir de la meilleure connaissance des situations météorologiques dont nous disposons. Les situations cibles pour lesquelles

une prévision est émise sont alors directement extraites des réanalyses météorologiques ERA-40 du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) [12] à résolution $2,5^\circ$ sur la période 01/08/1970 au 30/08/2002. Dans un second temps nous évaluerons les performances de prévision dans un contexte de prévision opérationnelle, où, sur une période de trois ans (du 01/10/2001 au 01/10/2004), les situations cibles sont décrites par les prévisions émises par le CEPMMT. L'archive pluviométrique utilisée a été construite à partir des réanalyses SAFRAN [13]. Nous disposons de lames d'eau journalières sur les cinq sous-bassins de la Seine. Les débits observés, ayant permis le calage et la mise à jour du modèle GR3P, ainsi que l'évaluation des prévisions de débits, sont extraits de la banque HYDRO.

III. ÉVALUATION EN CONTEXTE DE PRÉVISION PARFAITE

III.1. Prévision des pluies

Les méthodes de prévision par analogie ont d'abord été évaluées à l'aide du score $CRPSS$. Le gain obtenu par la méthode B (à quatre niveaux), par rapport à la méthode A (à deux niveaux) est notable, atteignant près de 5 points ($CRPSS$ de 52,4 % avec la méthode B contre 47,6 % avec la méthode A). Par ailleurs, les prévisions obtenues par la méthode B s'avèrent bien plus fines mais également plus justes, le score $CRPSS$ en finesse passant de 50,1 % (méthode A) à 56,1 % (méthode B), et en justesse de 45,3 % à 49,1 %.

Les scores POD et FAR ont été évalués pour les différents seuils présentés précédemment. Les deux méthodes permettent de détecter fréquemment les faibles événements pluvieux, notamment jusqu'au quantile seuil Q_{60} , pour lequel le score POD vaut 74,2 % et 75,9 % avec les méthodes A et B respectivement. Pour les événements plus importants, la probabilité de détection est nettement plus basse (score POD du quantile Q_{99} égal à 0,5 % (resp. 0,8 %) avec la méthode A (resp. B)), notamment en raison de la longueur limitée des archives. De manière générale, pour les scores catégoriques,

les différences entre méthodes restent faibles, même si la méthode *B* permet d'anticiper plus fréquemment l'ensemble des événements. Ce qui les différencie le plus est le taux de fausses alertes, nettement moins élevé lorsque la méthode *B* est appliquée. Ainsi par exemple, le score *FAR* associé au seuil *Q90* est de 29,7 % avec la méthode *A* contre 18,9 % avec la méthode *B*.

III.2. Prévision des débits

Les scénarios de précipitations, construits pour les deux méthodes suivant la procédure de tirage aléatoire décrite précédemment, ont été injectés dans le modèle hydrologique GR3P et les scénarios de débit ont été évalués. Les prévisions de pluie ont été exploitées jusqu'à $J+7$, puis des pluies nulles ont été injectées dans GR3P de $J+8$ à $J+13$. Les résultats obtenus avec le score *CRPSS* indiquent que la prévision hydrologique issue d'une méthode de prévision des pluies par analogie s'avère bien plus utile qu'une prévision naïve par critère de persistance (les valeurs du score *CRPSS* sont positives pour toutes les échéances). Le score *CRPSS* atteint un optimum vers l'échéance $J+9$ (10 jours), soit deux jours après que la dernière prévision de pluie ait été injectée, ce qui indique l'effet mémoire des bassins. L'augmentation des performances avec l'échéance traduit l'apport de l'information pluviométrique au fur et à mesure que l'échéance de prévision des débits augmente, en comparaison avec une prévision naïve basée sur la persistance. Par ailleurs, les différences entre les prévisions de débit issues des deux méthodes sont faibles, le modèle hydrologique ayant tendance à filtrer les écarts de précipitations prévues à l'aide des différentes méthodes, même pour une échéance de l'ordre de la semaine. La hiérarchie observée entre les méthodes sur les prévisions de pluie n'est alors pas nécessairement respectée sur les prévisions de débit, *i.e.* pour certains sous-bassins, les prévisions de débits basées sur les prévisions de pluie issues de la méthode *A* présentent un meilleur score que celles basées sur la méthode *B*.

Les scores *POD* et *FAR* ont été évalués pour chaque échéance de J à $J+7$. Pour les premières échéances de prévision ($< J+3$), les scores diffèrent peu d'une méthode d'analogie à une autre : l'effet des améliorations des pluies prévues sur la prévision de débits est donc limité. Au-delà de $J+3$, des différences un peu plus marquées apparaissent. Pour l'échéance $J+7$ (Figure 3), la capacité de détection des événements (score *POD*) est légèrement plus faible pour la

méthode *B*. Cependant, pour les deux méthodes de prévision des pluies, les valeurs de *POD* restent élevées et montrent que ces méthodes permettent d'anticiper, huit jours à l'avance ($J+7$), 40 à 50 % des événements forts (supérieurs au seuil *Q99*). Pour les fausses alertes, on note des différences de score dès les premières échéances, et les écarts se creusent plus nettement avec l'augmentation de l'échéance. Ainsi à $J+7$ (Figure 3, à droite), le taux de fausses alertes pour les événements forts (débit supérieur au seuil *Q90*) est nettement plus faible pour la méthode *B* (0,48 pour le seuil *Q99*) que pour la méthode *A* (0,59 pour le seuil *Q99*).

IV. ÉVALUATION EN CONTEXTE DE PRÉVISION OPÉRATIONNELLE

IV.1. Scores *CRPSS* des prévisions de pluies et débits

En plus des prévisions de pluie par analogie générées à partir des champs météorologiques prévus par le CEPMMT (contexte opérationnel) sur la période 01/10/2001-01/10/2004, nous avons également généré, sur la même période, les prévisions dans un contexte de prévision parfaite, les champs météorologiques étant alors décrits par les analyses du même modèle. Ceci permet de mettre en évidence la dégradation de la prévision des variables d'analogie dans les prévisions de pluie et de débit. Le score *CRPSS* a été évalué, dans les deux contextes d'élaboration d'une prévision, pour les prévisions de pluie et de débit à chaque échéance de prévision de J à $J+7$. L'évolution du score *CRPSS* en fonction de l'échéance est tracée sur la Figure 4 pour le bassin de l'Yonne-C.

Pour les précipitations (Figure 4 à gauche), l'écart entre une courbe pleine et une courbe discontinue correspond à l'erreur de prévision due au MNP. L'écart se creuse plus rapidement pour la méthode *B*, ce qui signifie que la prévision de la vitesse verticale se dégrade plus rapidement que celle des autres variables (géopotentiels, humidité). Ainsi, à partir de l'échéance $J+2$, les deux méthodes deviennent équivalentes, la méthode *A* devenant plus fiable que la méthode *B* à $J+7$. En revanche aux échéances J et $J+1$, la méthode *B* demeure plus performante.

Les résultats concernant les débits (Figure 4 à droite) sont équivalents à ceux obtenus sur les pluies. La méthode *B* reste plus performante en termes de *CRPSS* jusqu'à $J+7$. L'erreur due au MNP apparaît dès $J+2$ avec la méthode *B*,

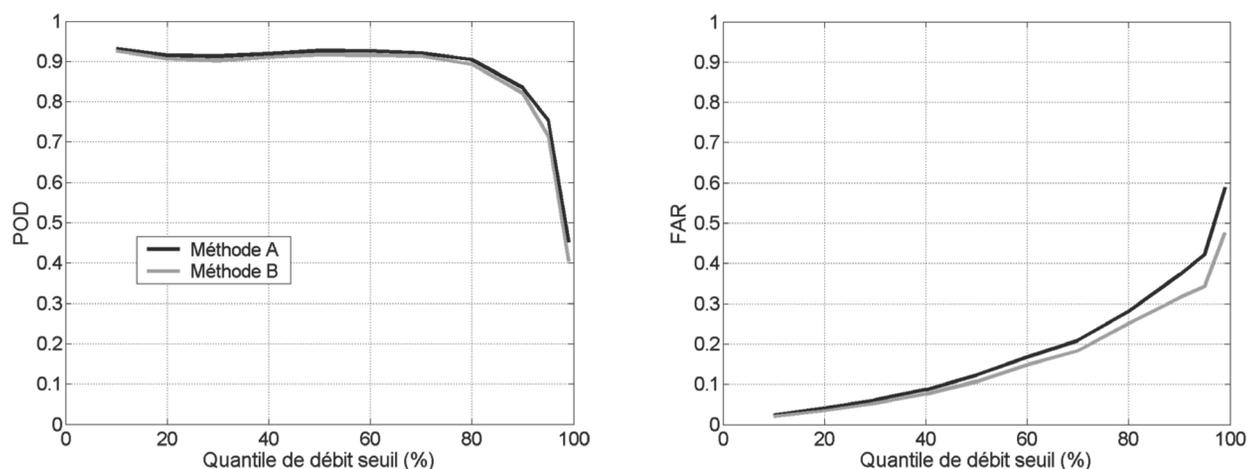


Figure 3 : Evolution des scores *POD* et *FAR* en fonction du débit seuil, pour l'échéance $J+7$, lorsque la prévision est définie par le quantile au non-dépassement d'ordre 90 % de la distribution des débits.

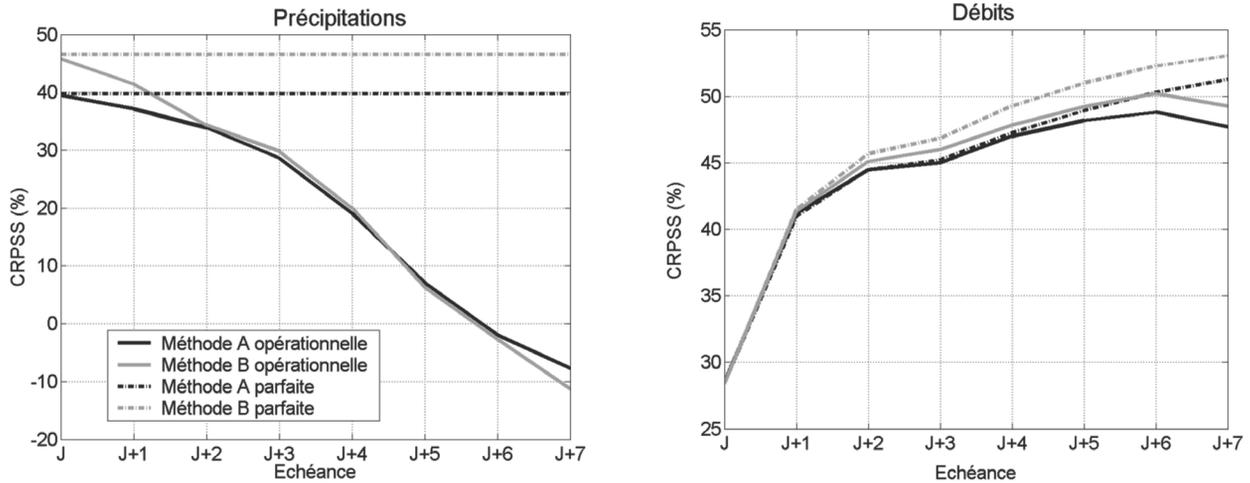


Figure 4 : Évolution du score CRPSS (%) en fonction de l'échéance pour le bassin de l'Yonne-C, lorsque les méthodes A et B de prévision par analogie sont appliquées dans les contextes de prévision parfaite et de prévision opérationnelle des précipitations.

tandis qu'elle n'apparaît qu'à J+5 avec la méthode A. Le fait que le score CRPSS varie pour les débits en sens inverse de celui des pluies est lié à la définition de la prévision de référence (même remarque que dans la section III.2).

IV.2. Étude de cas de crues

Quelques cas de crue ont été étudiés sur la période de trois ans afin de voir s'il est possible, grâce à ce type d'approche, de prévoir correctement les débits jusqu'à une semaine à l'avance. Deux cas sont illustrés dans cette section : un exemple de fausse alerte, et un exemple de bonne alerte. Le bassin d'application est celui du Loing à Episy (Loing-E) et les deux méthodes A et B de prévision par analogie sont appliquées.

Les prévisions de débit sont représentées par les valeurs des quantiles au non-dépassement d'ordre 10, 50 et 90 % (*Qdis10*, *Qdis50* et *Qdis90*) extraits de la distribution empirique des débits prévue pour chaque échéance, que nous qualifions de « scénarios » par simplicité. Par ailleurs, nous avons retenu ici un seuil de débit du Loing de 90 m³/s (noté *SI*), indiqué par un trait gris horizontal en tiretés. Le débit observé est indiqué en trait plein et le débit simulé par le modèle (alimenté en pluies réellement observées) est indiqué en trait discontinu.

IV.2.1. Exemple de fausse alerte

Dans un contexte de prévision opérationnelle des précipitations, nous sommes le 22 février 2002 au matin. Les scénarios de débit prévus à partir des méthodes A et B sont indiqués sur la Figure 5.

On observe que les sept jours suivants sont faiblement pluvieux. Cependant, les scénarios de débit obtenus à partir des prévisions de précipitations traduisent la prévision d'événements plus forts, avec notamment des débits élevés en fin d'échéance. La méthode A tend à sur-estimer les précipitations : même le quantile médian (*Qdis50*) dépasse le seuil *SI* à J+5 et J+6. La méthode B les sur-estime également, mais de façon moindre et semble assurer une meilleure cohérence temporelle : les débits associés aux scénarios *Qdis10* et *Qdis50* n'augmentent presque pas (ce qui n'est pas le cas avec la méthode A où on observe une hausse notable des débits entre le 25 et le 28 février).

IV.2.2. Exemple de bonne alerte

L'épisode de crue étudié a eu lieu au mois de janvier 2004, durant lequel le seuil *SI* a été dépassé le 14 janvier et le débit de pointe a été observé le 15 janvier. La Figure 6 montre que cet événement aurait pu être détecté sept-huit jours à l'avance en utilisant les méthodes d'analogie ici

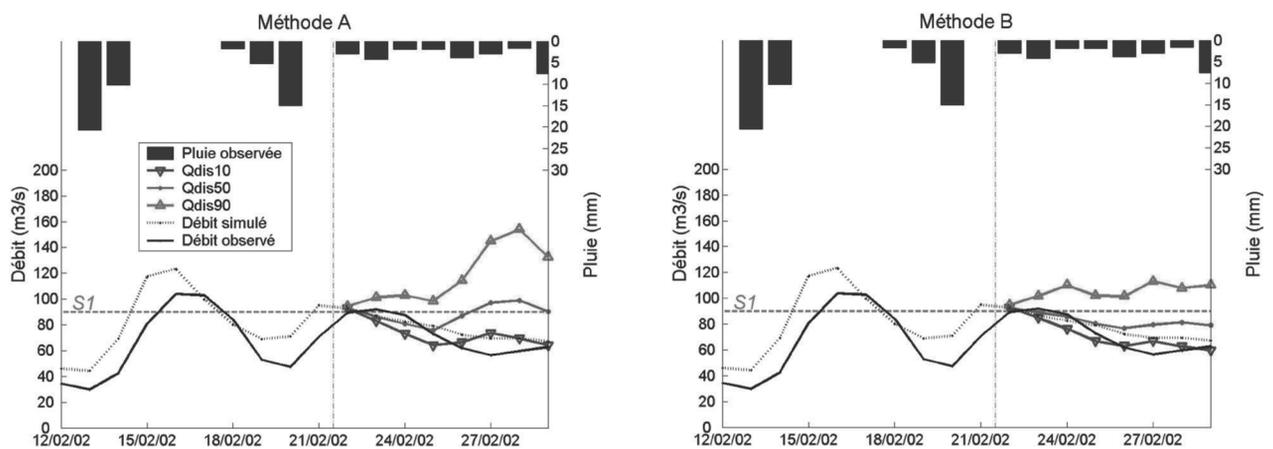


Figure 5 : Prévisions probabilistes de débit du Loing à Episy émises le 22 février 2002 pour les huit jours suivants, lorsque GR3P est alimenté par les scénarios de précipitations issus des méthodes A (gauche) et B (droite).

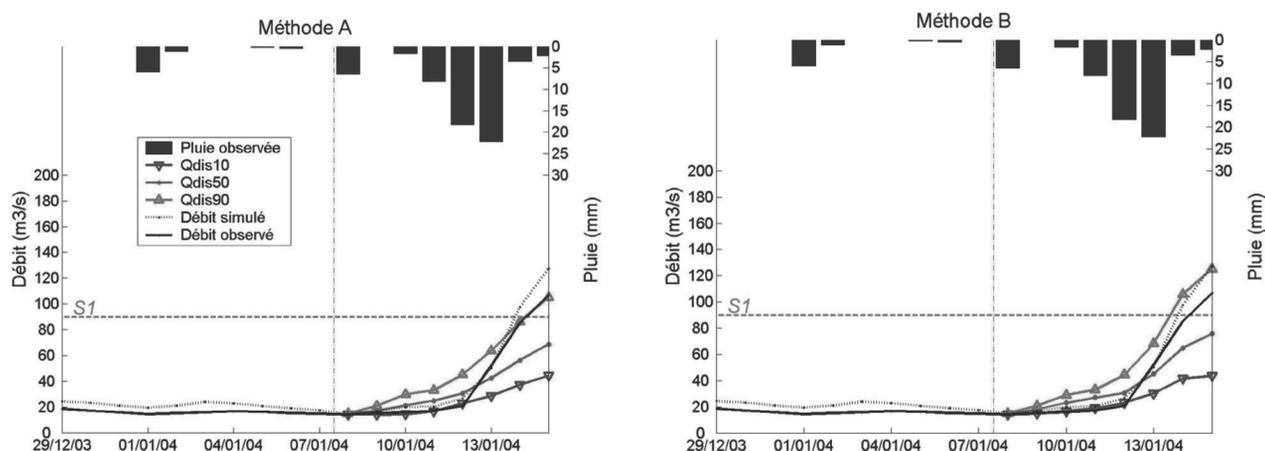


Figure 6 : Prévisions probabilistes de débit du Loing à Episy, émises le 8 janvier 2004 pour les huit jours suivants, lorsque le modèle est alimenté par les scénarios de précipitations issus des méthodes A (gauche) et B (droite).

étudiées : les prévisions obtenues le 8 janvier 2004 au matin montrent le dépassement du seuil $S1$ à l'échéance $J+6$ (i.e. avec sept jours d'anticipation).

Le débit simulé par le modèle lorsqu'il est alimenté par les pluies réellement observées est très proche du débit observé à la station d'Episy : l'erreur du modèle GR3P est donc négligeable. Certes une grande partie des scénarios de débit prévus ne dépassent pas le seuil $S1$, mais la borne supérieure représentée par le quantile $Qdis90$ dépasse ce seuil quelle que soit la méthode appliquée. L'élément à retenir est bien la concordance des scénarios, qui dans l'ensemble indiquent une hausse assez rapide du débit entre le 12 et le 15 janvier. Ceci devrait déjà avertir l'utilisateur de la chaîne d'une hausse fort probable du niveau du cours d'eau.

Par ailleurs, on notera que la méthode A semble sous-estimer les précipitations : ainsi à $J+7$ le quantile de débit $Qdis90$ reste inférieur au débit simulé. D'autre part, cette méthode ne semble pas capable de reproduire correctement la répartition temporelle des précipitations en termes quantitatifs : la courbe associée au quantile $Qdis90$ n'a en effet pas une pente similaire à celle de la courbe du débit simulé, contrairement à ce que l'on observe avec la méthode B.

V. CONCLUSIONS

L'objet de cette étude a été d'appliquer une méthode de prévision des pluies par recherche d'analogues à la prévision des crues sur le bassin de la Seine. La prévision des précipitations a été réalisée à partir d'une sélection de situations analogues en deux niveaux (méthode A : champ de pression et hygrométrie [7]) et quatre niveaux (méthode B : en rajoutant température et vitesse verticale [8]), pour des échéances allant de un à huit jours.

Dans un contexte de prévision parfaite (situations cibles réanalysées), la seconde méthode s'avère globalement plus performante sur les pluies, permettant d'obtenir des distributions beaucoup plus fines, et de diminuer sensiblement le nombre de fausses alertes. Par ailleurs, en considérant un quantile haut de la distribution des débits, près de la moitié des événements forts étudiés ici sont anticipés huit jours à l'avance. En conditions opérationnelles (situations cibles prévues par un MNP), la performance de prévision diminue avec l'échéance en raison des erreurs de prévision du MNP, qui s'avèrent plus importantes pour la vitesse verticale : ainsi la seconde méthode est plus performante que la première à J

et $J+1$. Au-delà, les deux sont équivalentes, ce qui n'empêche pas cependant d'obtenir jusqu'à $J+7$ des prévisions de débit plus performantes avec la méthode B. Enfin, l'étude de cas de crues menée a montré qu'il était possible d'anticiper un événement huit jours à l'avance, même si des fausses alertes peuvent être observées.

Enfin, l'approche par recherche d'analogues serait finalement une méthode à considérer en complément aux autres outils déjà employés dans les SPC. Grâce à cette technique, les services opérationnels disposeraient de prévisions utiles à des échéances plus lointaines, ce qui leur permettrait de mieux anticiper d'éventuels événements de crue.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient en particulier les services opérationnels avec qui nous avons collaboré tout au long de nos recherches : les SPCs Rhône amont-Saône et Seine amont-Marne amont.

VII. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] THIREL G., RNOUSSET-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
- [2] RAMOS M.H., THIELEN J., & PAPPENBERGER F. (2008) — Utilisation de la prévision météorologique d'ensemble pour la prévision hydrologique opérationnelle et l'alerte aux crues, *Colloque SHF Prévisions hydrométéorologiques, Lyon, 18-19 Novembre 2008*. 191-199
- [3] MARTY R., ZIN I., & OBLÉD, CH. (2008) — On adapting PQPFs to fit hydrological needs : the case of flash flood forecasting, *Atm. Sci. Letters*. **9** 73-79
- [4] DIOMEDE T., NEROZZI F., PACCAGNELLA T., & TODINI E. (2008) — The use of meteorological analogues to account for LAM QPF uncertainty, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **12** 141-157
- [5] BEN DAUD A., SAUQUET E., BONTRON G., OBLÉD, CH., & LANG M. (2009) — La prévision des précipitations par recherche d'analogues : état de l'art et perspectives, *La Houille Blanche*. **6** 60-65
- [6] LORENZ E.N. (1969) — Atmospheric predictability as revealed by natural occurring analogues, *Journal of the Atm. Sci.* **26** 636-646

- [7] BONTRON G. (2004) — Prévision quantitative des précipitations : adaptation probabiliste par recherche d'analogues. Utilisation des réanalyses NCEP-NCAR et application aux précipitations du Sud-Est de la France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble
- [8] BEN DAUD A. (2010) — Améliorations et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie. Application à la prévision hydrologique sur les grands bassins fluviaux de la Saône et de la Seine. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble
- [9] TANGARA M. (2005) — Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris
- [10] BERTHET L., ANDREASSIAN 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
- [11] HAMILL T.M., & WHITAKER J.S. (2007) — Ensemble Calibration of 500-hPa Geopotential height and 850-hPa and 2-m temperatures using reforecasts, *Monthly Weather Review.* **135** 3273-3280
- [12] UPPALA ET AL. (2005) — The ERA-40 re-analysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **131** 2961-3012
- [13] VIDAL J.-P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY L., BAILLON M., & SOUBEYROUX J.-M. (2010) — A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. DOI: 10.1002/joc.2003, *International Journal of Climatology*