

ESTIMATION DES INCERTITUDES ASSOCIÉES AUX PRÉVISIONS DE PLUIE EXPERTISÉES ET INTÉGRATION DANS LA CHAÎNE DE PRÉVISION DES CRUES

*Assessing the uncertainties related to expertised rainfall forecasts within the
flood forecasting chain*

Auteurs : GENIN Sanda^{1*}, DOURDET Vincent¹, PIOTTE Olivier¹, DANNE Alexandre¹,
TILMANT Francois², LACAZE Yan¹

¹Direction Régionale de l’Environnement de l’Aménagement et du Logement de Nouvelle-Aquitaine, Cité administrative, rue Jules Ferry, 33090 Bordeaux Cedex, France,
email : sanda.genin@developpement-durable.gouv.fr, vincent.dourdet@developpement-durable.gouv.fr, olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr,
alexandre.danne@developpement-durable.gouv.fr, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr

²Université Paris Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex, France, email : francois.tilmant@inrae.fr

Résumé : Les Services de Prévision des Crues (SPC) n’ont pas à ce jour accès à une quantification de l’incertitude météorologique intégrée à la chaîne de prévision hydrologique opérationnelle. Les prévisions de pluies expertisées envoyées par Météo-France comportent un indice de confiance sous forme d’intervalle « forfaitaire » sans signification probabiliste, ce qui complique leur exploitation mathématique dans la chaîne de prévision.

L’objectif de cet article est de présenter un travail expérimental, mené par le SPC Gironde-Adour-Dordogne (GAD) sur un sous-bassin versant de l’Adour (période 2017-2022), visant à proposer une quantification de l’incertitude météorologique à partir de prévisions de pluie expertisées et son intégration dans la chaîne opérationnelle de prévision. Ce travail a permis in fine de déterminer des tendances calibrées combinant incertitudes associées aux prévisions de pluie expertisées et incertitudes de modélisation pour la station d’étude.

Ce travail s’inscrit dans le cadre plus large de l’amélioration de la prise en compte et de l’estimation des incertitudes par les prévisionnistes du SPC GAD. En perspective de cette expérimentation, une généralisation à l’ensemble des stations réglementaires de prévision des crues ainsi que le développement d’un outil d’aide à la décision à destination des prévisionnistes sont prévus.

Mots-clefs : incertitudes, prévisions météorologiques, modélisation hydrologique, GRP, prévision des crues

Abstract : The Flood Forecasting Services (FFS) currently do not have access to a quantification of meteorological uncertainty integrated into the operational hydrological forecasting chain. The expert rainfall forecasts sent by Météo-France include a confidence index in the form of a non-probabilistic "fixed" range interval without probabilistic meaning, which complicates their mathematical exploitation in the forecasting chain.

The objective of this article is to present an experimental work conducted by the Gironde-Adour-Dordogne (GAD) FFS on a sub-catchment of the Adour River (period 2017-2022), aiming to propose a quantification of meteorological uncertainty based on expert rainfall forecasts and its integration into the operational forecasting chain. This work ultimately made it possible to determine calibrated trends combining uncertainties associated with expert rainfall forecasts and modeling uncertainties for the study station.

This work is part of a broader effort to improve the consideration and estimation of uncertainties by the forecasters of the GAD FFS. In view of this experimentation, a generalization to all regulatory flood forecasting stations as well as the development of a decision support tool for forecasters are planned.

Keywords: Uncertainties, weather forecasts, hydrological modeling, GRP, flood risk management, flood forecasting

1. INTRODUCTION

Le sujet de l'estimation des incertitudes en prévision des crues n'est pas nouveau. Les différents maillons de la chaîne opérationnelle introduisent des incertitudes : observations et prévisions météorologiques, données hydrométriques, modélisation hydrologique et hydraulique, etc. Afin de fournir sur Vigicrues des prévisions expertisées de hauteur d'eau (ou de débit) fiables avec leur intervalle de couverture à 80 %, les services de prévision des crues (SPC) s'attachent à estimer ces incertitudes dans les différents maillons de la chaîne de production.

En prévision des crues, on décompose généralement l'incertitude totale de la chaîne de prévision en deux composantes principales : l'incertitude portant sur les forçages d'entrée (les prévisions météorologiques) d'un côté, et l'incertitude portant sur la modélisation, qu'elle soit hydrologique ou hydraulique, de l'autre (Krzysztofowicz[1]). De nombreux travaux portant sur les méthodes et outils d'estimation des incertitudes ont été réalisés ces dernières années.

Parmi les nombreuses approches possibles pour estimer les incertitudes de modélisation, les SPC utilisent majoritairement la méthode QUOIQUE (Bourgin [2]) via l'outil de post-traitement OTAMIN (Viatgé [3]), qui propose une approche empirique et non paramétrique. Cette approche allie simplicité et robustesse, y compris dans un contexte d'extrapolation (Berthet *et al* [4]).

Concernant l’incertitude liée aux forçages météorologiques, l’utilisation de prévisions d’ensemble (voire de multi-ensembles), associées à des post-traitements bien placés au sein de la chaîne de prévision visant à parfaire leur fiabilité et à conserver la cohérence temporelle des scénarios hydro-météorologiques, est une approche couramment proposée (Bellier [5], entre autres).

Toutefois, les SPC n’ont à ce jour accès aux prévisions d’ensemble météorologiques qu’à titre expérimental et utilisent en routine une autre source de données : les prévisions de pluies expertisées par Météo-France, contenues dans le bulletin de précipitations (BP) qui leur est destiné. Ces prévisions comportent un indice de confiance sous forme d’intervalle « forfaitaire » non probabilisé, ce qui complique leur exploitation mathématique dans la chaîne de prévision.

L’objectif de cet article est de présenter un travail expérimental, mené par le SPC Gironde-Adour-Dordogne (GAD) sur un sous-bassin versant de l’Adour (période 2017-2022), visant à proposer une quantification de l’incertitude météorologique à partir de prévisions de pluie expertisées et son intégration dans la chaîne opérationnelle de prévision. Ce travail s’inscrit dans le cadre plus large de l’amélioration de la prise en compte et de l’estimation des incertitudes par les prévisionnistes du SPC GAD, qui va de pair avec une amélioration de leur outillage opérationnel.

2. LES BULLETINS DE PRÉCIPITATIONS

Les directions régionales de Météo-France sont responsables de la prévision météorologique à destination des SPC, produite et diffusée deux fois par jour sous la forme de bulletins de précipitations (BP). Ceux-ci contiennent principalement des valeurs de pluie prévue sur un zonage prédéfini (figure 1, le bassin versant de Cambo-les-Bains sur la Nive situé sur la zone Nive/Nivelle) pour le jour J en cours et les jours J+1 et J+2. Elles sont communiquées sous forme d’intervalles fixes et pré-définis, par exemple 15/30 mm, éventuellement complétés par une valeur traduisant le maximum localement possible au sein de la zone concernée.

Les valeurs du BP sont issues de l’expertise du prévisionniste météo à partir des résultats des modèles AROME, ARPEGE et CEP. Elles constituent la donnée d’entrée de référence pour la prévision hydrologique réalisée par les SPC.

Un paragraphe de commentaire complète ces valeurs de façon qualitative avec des informations sur tout phénomène pouvant influencer sur l’écoulement et le niveau des cours d’eau (la limite pluie/neige, la fonte nivale, les intensités horaires de pluie, les surcotes marines, etc.), ainsi que le modèle météorologique retenu par le prévisionniste météo et le degré de confiance dans la prévision.

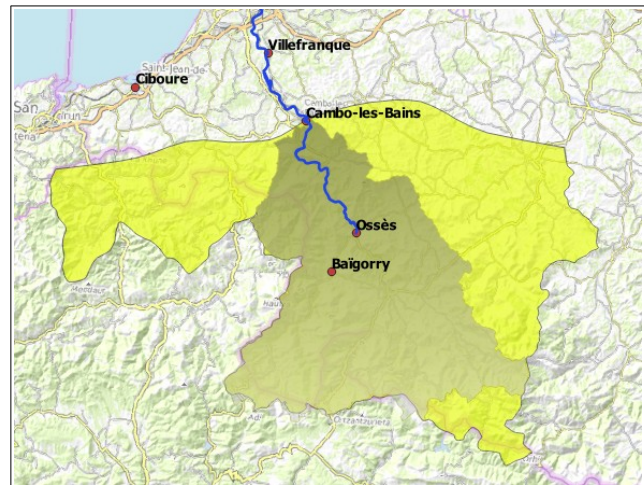


Figure 1 : Zone AP « alerte précipitation » Nive/Nivelle (jaune) qui inclut le bassin versant de Cambo-les-Bains (gris) et le tronçon Vigicrues de la Nive (bleu).

3. PROBABILISER L’INCERTITUDE MÉTÉOROLOGIQUE

Le travail expérimental s’effectue sur le bassin versant d’une station réglementaire de prévision des crues qui dispose d’un modèle hydrologique GRP ([6] et [7]) calé et de bonne qualité : Cambo-les-Bains sur la Nive (bassin de l’Adour).

La première étape de la méthode consiste à extraire les intervalles normés (valeurs minimales et maximales) de prévision de pluie issues des bulletins de prévision météorologique transmis le matin : 0, Traces/3 mm, 1/5 mm, 3/10 mm, 7/15 mm, 10/20 mm, 15/30 mm, 20/40 mm, 30/50 mm et 50/80 mm. La figure 2 présente l’occurrence des intervalles normés d’intérêt sur la période étudiée, à la station de Cambo-les-Bains ; les intervalles normés inférieurs à 7/15 mm ayant une influence limitée sur la réaction hydrologique, ne sont pas représentés.

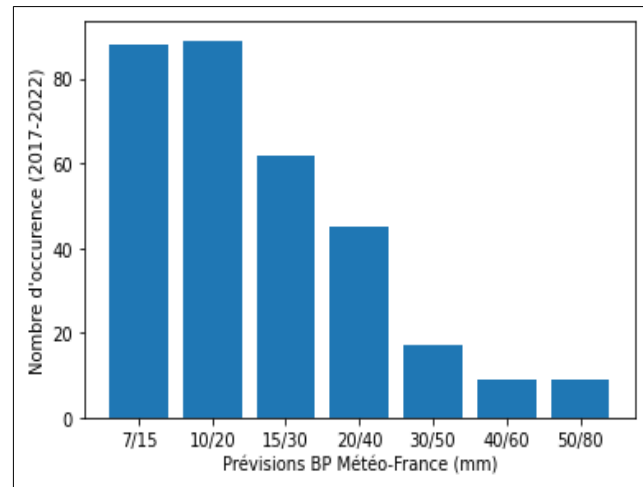


Figure 2 : Occurrence de chaque intervalle normalisé de prévision du bulletin précipitation sur la période 2017-2022 à la station de Cambo-les-Bains.

Pour chacun de ces intervalles type de pluie prévue, la distribution des valeurs de pluie réellement observées sur les 24h couvertes par le BP permet de calculer des probabilités de non-dépassement des bornes de l’intervalle prévu et de déterminer les quantiles Q10, Q20..., Q90. Ils sont nommés par la suite Q10-90^{BP}. Un exemple de Q10-90^{BP} pour l’intervalle de prévision météorologique 7/15 mm sur le bassin de la station de Cambo-les-Bains sur la Nive est présenté en figure 3.

Cette analyse fournit déjà une précieuse indication sur l’incertitude des prévisions météorologiques introduites comme forçage en entrée des modèles hydrologiques. En outre, elle permet de disposer des quantiles par bassin versant d’une station de prévision des crues, là où les prévisions dans les BP sont fournis à une échelle plus large couvrant plusieurs bassins versants.

De plus, l’intervalle normé du BP étant fixé par convention, il ne doit pas être considéré comme une estimation de l’incertitude sur la prévision des pluies mais comme un encadrement forfaitaire du cumul expertisé par le prévisionniste météo.

L’utilisation des quantiles dans les modèles de prévision des crues n’a pas pour objectif de remplacer les intervalles de prévision de pluie normés fournis par Météo-France et qui constituent la donnée d’entrée de référence, mais d’apporter une meilleure signification à cette production et un élément complémentaire dans l’analyse de la situation par le prévisionniste des crues.

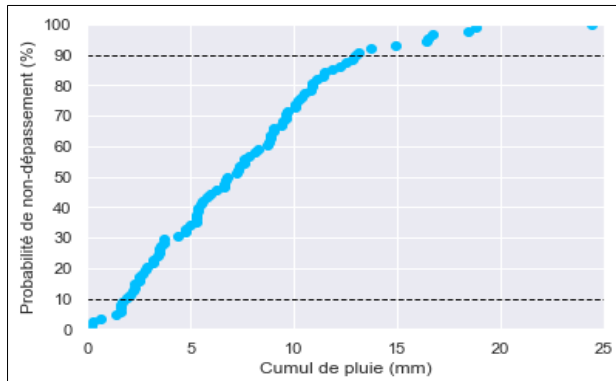


Figure 3 : Probabilité de non-dépassement et quantiles de pluie observée $Q10^{BP}$ et $Q90^{BP}$ pour l'intervalle de prévision météorologique 7/15 mm, le jour J à la station de Cambo-les-Bains, sur la période 2017-2022

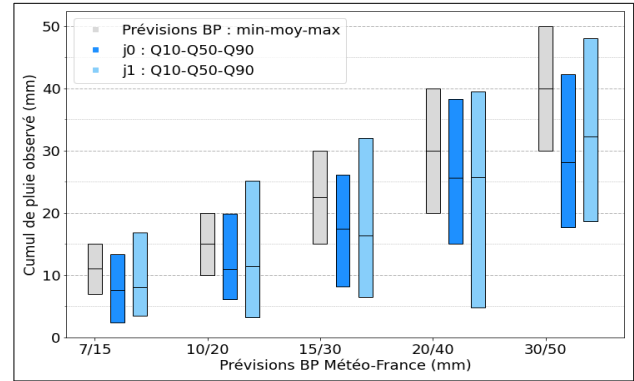


Figure 4 : Quantiles de pluie observée $Q10-50-90^{BP}$ pour tous les intervalles de prévision météorologique, pour les jours J et J+1, à la station de Cambo-les-Bains, sur la période 2017-2022

La figure 4 présente les quantiles de pluie observée $Q10^{BP}$, $Q50^{BP}$ et $Q90^{BP}$ pour tous les intervalles de prévision météorologique, pour les jours J et J+1, à la station de Cambo-les-Bains, sur la période 2017-2022. Cette figure met en évidence que les valeurs maximales des intervalles des BP sont assez proches du $Q90^{BP}$, qui pourrait correspondre à une tendance haute du point de vue des pluies prévues, alors que les valeurs minimales et centrales des intervalles des BP sont systématiquement surestimantes par rapport aux $Q10^{BP}$ et $Q90^{BP}$, qui pourraient correspondre à des tendances basse et centrales du point de vue des pluies prévues. Cette surestimation peut s'expliquer, entre autres, par la contrainte des intervalles normés fixés par convention, le prévisionniste météo ayant probablement tendance à accorder plus d'importance à la borne supérieure : un cumul expertisé de pluie de 18 mm sera préférentiellement traduit par le prévisionniste météo par l'intervalle 15/30 mm plutôt que par l'intervalle 10/20 mm.

À ce stade de l'expérimentation, les quantiles de pluie prévue obtenus à partir des BP peuvent être utilisés par le prévisionniste Vigicrues de manière « manuelle » dans certains outils d'analyse hydrologique et d'aide à la décision (abaques, catalogues de crues, etc.) afin de consolider l'estimation des incertitudes sur les pluies prévues. Par exemple, un intervalle BP 7/15 mm à Cambo-les-Bains, deviendrait 2-13 mm pour les quantiles 10-90 (cf. figure 3).

4 PROBABILISER L'INCERTITUDE HYDROLOGIQUE

La deuxième étape de la méthode consiste à alimenter le modèle hydrologique GRP avec les 9 chroniques de pluie prévues probabilisées issues du $Q10-Q90^{BP}$ et la chronique de pluies observées entre 2017 et 2022 pour la station de Cambo-les-Bains sur la Nive. Cela permet d'obtenir 10 séries de prévisions hydrologiques. Les données d'entrée du modèle hydrologique GRP étant au pas de temps horaire, les $Q10-90^{BP}$ disponibles au pas de temps 24h ont été redistribués au pas de temps horaire selon la pluie observée.

Lors de la troisième étape de la méthode, les dix chroniques de prévisions issues du modèle hydrologique GRP font l'objet d'un post-traitement OTAMIN [3] (calé au préalable pour le modèle

GRP) qui produit pour chaque prévision, 9 séries de débits probabilisés nommées Q_{10-90}^{GRP} , soit un total de 90 séries de prévisions de débits, 81 pour chaque couple Q_{XX}^{BP} - Q_{YY}^{GRP} et 9 issues de la prévision GRP en pluies observées. L’analyse qui suit a été conduite sur la série à horizon de prévision 6 heures (horizon de calage du modèle GRP à la station de Cambo-les-Bains).

Nota bene : l’estimation des incertitudes de modélisation par des approches empiriques, telle que la méthode QUOIQUE employée ici et dans la majorité des SPC, n’est pas l’objet central de cet article et ne sera pas développée davantage.

L’étape finale de la méthode vise à comparer les sorties de modélisation probabilisées et l’observation afin de déterminer les combinaisons Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} qui répondent au mieux à l’objectif cible de fiabilité des prévisions à 80 %, soit Q_{10} - Q_{90}^{cible} tout en assurant une finesse aussi réduite que possible. La figure 5 schématise l’ensemble de la méthode.

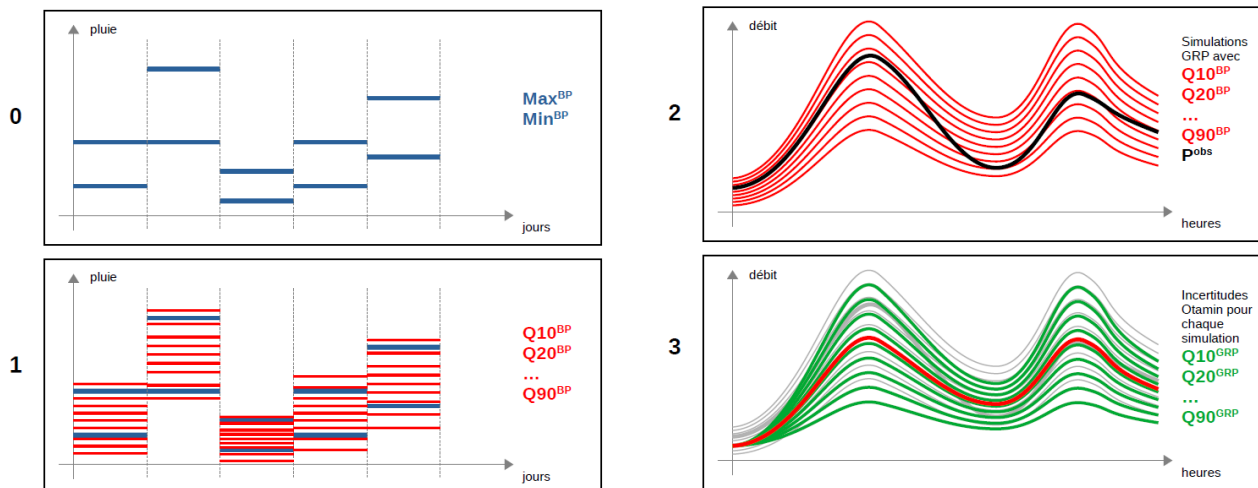


Figure 5 : Schéma de la méthode employée. Étape 0 : extraction des valeurs minimales et maximales de prévision de pluie issues des BP. Étape 1 : création des chroniques de pluies probabilisées Q_{10} - Q_{90}^{BP} . Étape 2 : simulation avec le modèle GRP à partir de ces chroniques de pluies prévenues probabilisées. Étape 3 : estimation des incertitudes à l’aide d’OTAMIN pour produire les séries de débits probabilisés Q_{10} - Q_{90}^{GRP} pour chaque simulation de l’étape 2

Afin d’obtenir les couples Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} qui répondent le mieux au Q_{10} - Q_{50} - Q_{90}^{cible} , une matrice à double entrée Q_{xx}^{BP} / Q_{xx}^{GRP} a été établie et trois critères de choix ont été retenus.

- Critère de fiabilité : les couples de quantiles Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} doivent présenter un taux de non-dépassement de $\pm 5 \%$ pour Q_{10} , $\pm 10 \%$ pour Q_{50} et $\pm 5 \%$ pour Q_{90} ;
- Critères de précision et finesse : les couples de quantiles Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} doivent présenter une erreur absolue moyenne avec les observations la plus faible possible ;
- Critère d’homogénéité : il est préférable que les couples de quantiles Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} reposent sur des fréquences proches afin d’éviter les extrêmes du type Q_{10}^{BP} - Q_{90}^{GRP} .

Afin d’éliminer l’influence des débits en basses eaux, la matrice a été réalisée pour des valeurs de débit observé supérieures à une valeur seuil de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (qui correspond à un seuil en fréquence de 90%) sur les débits instantanés observés.

La figure 6 présente la matrice à double entrée pour l’horizon de prévision 6 heures et met en évidence le triplet de couples Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} qui répondent le mieux au Q_{10} - Q_{50} - Q_{90}^{cible} : Q_{50}^{BP} - Q_{30}^{GRP} pour la tendance basse, Q_{60}^{BP} - Q_{60}^{GRP} pour la centrale et Q_{70}^{BP} - Q_{90}^{GRP} pour la tendance haute (encadré noir). Ces 3 couples répondent en effet aux différents critères :

- Critère de fiabilité : cases bleues pour Q_{10} , jaune pour Q_{50} , rouge pour Q_{90} ;
- Critères de précision et finesse : cases avec valeur la plus faible possible
- Critère d’homogénéité : cases proches de la diagonale représentée en trait double

Cambo-les-Bains 6h – sup seuil 70 m³/s

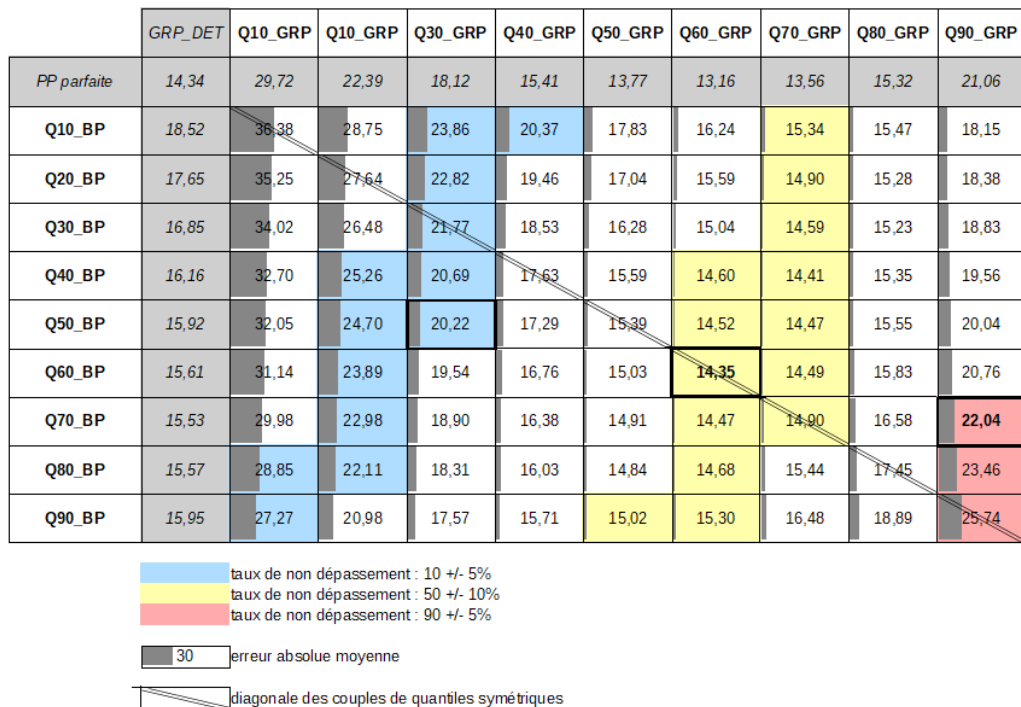
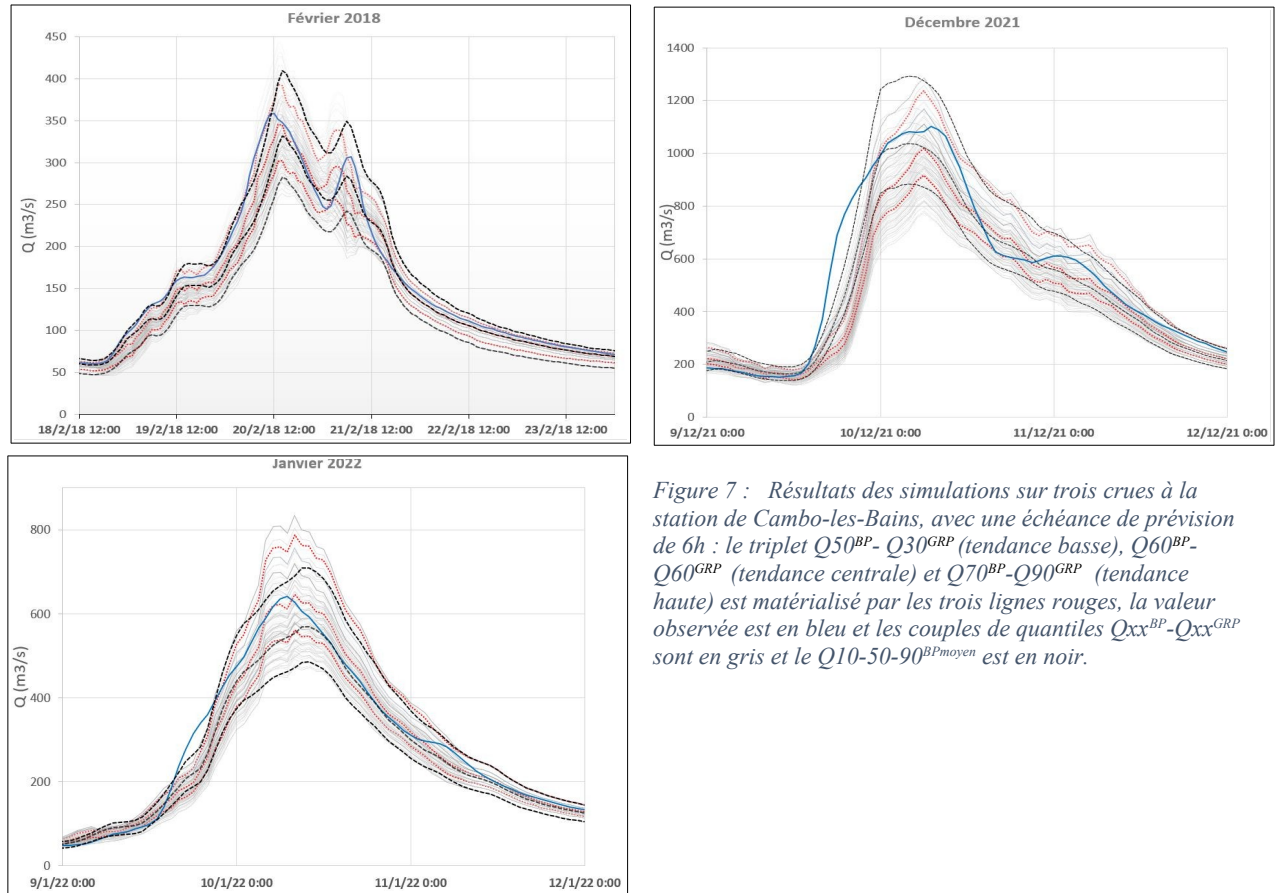


Figure 6 : Matrice à double entrée représentant les quantiles Q_{xx}^{BP} et Q_{xx}^{GRP} pour l’horizon de prévision 6h. DET représente les résultats déterministes du modèle GRP et PP la pluie parfaite.

Le triplet Q_{50}^{BP} - Q_{30}^{GRP} (tendance basse), Q_{60}^{BP} - Q_{60}^{GRP} (tendance centrale) et Q_{70}^{BP} - Q_{90}^{GRP} (tendance haute) a été testé sur trois crues d’ampleur différente et assez bien reproduites par le modèle GRP : février 2018 (débit maximum atteint de 350 m³/s, vigilance crues jaune), décembre 2021 (débit maximum atteint de 1200 m³/s, vigilance crues orange) et janvier 2022 (débit maximum atteint de 600 m³/s, vigilance crues jaune).

Les résultats obtenus sont présentés en figure 7, et représentent des prévisions à 6h d’échéance. Hormis pour certaines phases de montée en crue où la réactivité du modèle peut être limitante, la grande majorité des observations se situent à l’intérieur du triplet d’incertitudes combinant incertitudes

associées aux prévisions de pluie expertisées et incertitudes de modélisation déterminées sur l'ensemble de la chronique d'étude.



Afin de mesurer l'intérêt opérationnel réel de cette méthode, ces résultats avec des combinaisons d'incertitudes méritent d'être comparés avec une approche plus simple (et déjà pratiquée au SPC), à savoir l'utilisation d'un seul scénario médian de précipitations (BP moyen) en entrée du modèle GRP, post-traité avec les quantiles 10, 50 et 90 des incertitudes de modélisation obtenues par la méthode Quoique (prise en compte uniquement des incertitudes de modélisation hydrologique au titre des incertitudes globales sur la prévision). La comparaison est réalisée sur toute la chronique étudiée (2017-2022). Les résultats (figure 8) pour les valeurs de débit supérieures à $70 \text{ m}^3/\text{s}$ montrent des résultats proches (mais légèrement inférieurs pour la méthode combinée) en termes de fiabilité (cible 80%) et de précision, et un avantage plus net pour la méthode combinée en termes de finesse.

Période étudiée : 2017-2022	Taille de l'échantillon	Fiabilité QXX ^{BPmoyen} comparé à l'observation	Fiabilité QXX ^{BPGRP} comparé à l'observation	Précision QXX ^{BPmoyen} comparé à l'observation	Précision QXX ^{BPGRP} comparé à l'observation	Finesse QXX ^{BPmoyen} comparé à l'observation	Finesse QXX ^{BPGRP} comparé à l'observation
Tous les débits	40 688	93%	85%	2.5	2.6	10.2	6.7
Débits > 70 m³/s	4 288	84%	73%	13.8	14.4	44.6	33.4

Figure 8 : Comparaison entre les valeurs issues du BP moyen et de l'enchaînement BP GRP

5. CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail expérimental visant à proposer une quantification de l'incertitude météorologique à partir de prévisions de pluie expertisées et son intégration dans la chaîne opérationnelle de prévision a été atteint. Il a permis in fine de déterminer une fourchette d'incertitudes calibrée combinant incertitudes associées aux prévisions de pluie expertisées et incertitudes de modélisation pour la station d'étude, Cambo-les-Bains sur la Nive.

La méthode retenue dans le cadre de cette étude présente néanmoins ses limites notamment par la taille de l'échantillon des prévisions de pluie avec des données depuis 2017 engendrant une faible représentativité des forts cumuls, une expertise humaine derrière les prévisions dans le BP induisant de possibles biais dans la représentativité et le choix de considérer le bulletin de prévision du matin du jour J comme référence. L'intégration des nouvelles prévisions expertisées en continu permettra dans le futur d'augmenter la taille de l'échantillon et de réduire ces limites. Il pourrait également être intéressant d'exploiter les autres échéances du bulletin BP : J+1, J+2 ainsi que les BP de l'après-midi.

En perspective de cette expérimentation, une généralisation à l'ensemble des stations réglementaires de prévision des crues ainsi que le développement d'un outil d'aide à la décision à destination des prévisionnistes sont prévues. L'ajout des pluies prévues probabilisées, en complément des autres scénarios issus directement des BP, en entrée des modèles hydrologiques pourrait également être mis en œuvre afin d'apporter aux prévisionnistes un éclairage complémentaire.

L'application de la méthode sur d'autres bassins, avec des caractéristiques différentes (notamment sur la pondération des incertitudes météorologiques et hydrologiques) permettra de déterminer si l'approche de combinaison des incertitudes apporte une plus-value et peut être proposée au prévisionniste. Dans tous les cas, le travail d'expertise humaine sur chaque crue devra s'adapter à la spécificité du phénomène en cours.

Enfin, à plus long terme, l'intégration des prévisions d'ensemble météorologiques dans les chaînes de prévision hydrologiques des SPC, approche maintenant bien documentée, est envisagée mais prendra vraisemblablement encore plusieurs années pour être pleinement opérationnelle.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Krzysztofowicz R. (1999). *Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model*. Water Resources Research, 35, p. 2739–2750.
- [2] Bourgin F. (2014). *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique?* Thèse de doctorat, AgroParisTech/ENGREF, Paris, 208 pp.

- [3] Viatgé J., Berthet L., Marty R., Bourgin F., Piotte O., Ramos MH., Perrin C. (2019). *Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France*. La Houille Blanche, vol. 105.
- [4] Berthet L., Bourgin F., Perrin C., Viatgé J., Marty R., Piotte O. (2019). *A crash-testing framework for predictive uncertainty assessment when forecasting high flows in an extrapolation context*. EGU.
- [5] Bellier J. (2018). *Prévisions hydrologiques probabilistes dans un cadre multivarié : quels outils pour assurer fiabilité et cohérence spatio-temporelle ?* Thèse de doctorat, Université Grenoble – Alpes.
- [6] Tangara M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de Doctorat, Cemagref Antony, EPHE, Paris, 374 pp.
- [7] Berthet L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech, Paris, 603 pp.