



VERS LA GENERALISATION DE LA PREVISION HYDROLOGIQUE PROBABILISTE AU SEIN DU RESEAU VIGICRUES : ESTIMATION, EVALUATION ET COMMUNICATION

*Towards the spread of probabilistic flood forecasts in France :
assessment, verification and communication*

Auteurs : BELLEUDY Anne^{1*}, MARTY Renaud², LE PAPE Etienne¹, NARBAIS-
JAUREGUY Didier¹, ZUBER Félicien¹

* *auteur correspondant*

¹SCHAPI, 42 avenue Gaspard Coriolis , 31057 Toulouse Cedex 1, France,
anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr, etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr,
didier.narbais-jaureguy@developpement-durable.gouv.fr,
felicien.zuber@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon, CS 96407, 45065 Orléans, France,
renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

Résumé : Depuis 2014, le réseau Vigicrues a mis en place des outils et des méthodes pour estimer et expertiser l'incertitude prédictive. Les incertitudes liées à la modélisation hydrologique sont estimées par le logiciel OTAMIN, qui analyse statistiquement les écarts entre les observations et les débits simulés par les modèles à l'issue de leur calage. Un logiciel permettant l'expertise de scénarios hydrologiques avec incertitudes, l'EAO, a été développé. Ces outils ont rendu possible la diffusion de prévisions expertisées assorties d'un intervalle d'incertitude (10-90%) dès 2017. L'outil Scores, qui permet d'évaluer les prévisions, a également été enrichi de fonctionnalités permettant de traiter des prévisions probabilistes.

Le projet stratégique du réseau Vigicrues prévoit de renforcer le service rendu sur les secteurs à fort enjeu. L'objectif est de publier des prévisions quantitatives assorties d'incertitudes à 24 heures d'échéance et avec un pas de temps suffisamment fin pour représenter la dynamique de la crue, y compris sur des cours d'eau à réaction rapide. Pour réaliser cet objectif, des évolutions sont nécessaires sur les outils et les pratiques opérationnelles, notamment par la construction de chaînes de prévision forcées par des modèles d'ensemble météorologiques, l'amélioration de la quantification des autres sources d'incertitude et une réflexion sur le rôle du prévisionniste et la communication des incertitudes.

Mots-clefs : Prévision des crues, incertitudes, prévisions expertisées

Abstract : Since 2014, Vigicrues has introduced tools and methods for estimating and assessing predictive uncertainty. Uncertainties linked to hydrological modelling are estimated using OTAMIN software, which statistically analyses the differences between observations and flow rates simulated with adjusted models. EAO software has also been developed to provide expertise on probabilistic forecasts. These tools enabled the dissemination of quantitative forecasts with an uncertainty interval (10-90%) from 2017. The Scores tool, used to evaluate forecasts, has also been enhanced with functions for processing probabilistic forecasts.

Vigicrues' strategic plan aims to provide a better service in high-vulnerability areas. Its purpose is to publish quantitative forecasts with uncertainties at 24-hour intervals and with a time step

tailored to closely represent the flood dynamics, including on fast-response rivers. To reach this goal, operational tools and practices will have to evolve, particularly through the development of forecast chains forced by meteorological ensemble models, better quantification of other sources of uncertainty, and real consideration on the forecaster's role and the communication of uncertainties.

Keywords: flood forecasting, uncertainty, ensemble forecasts

1. Introduction

La vigilance crue en France est constituée de plusieurs éléments d'information, produits par le réseau Vigicrues :

- Une carte de vigilance, sur laquelle une couleur de vigilance correspondant au niveau de risque de crue des 24 prochaines heures est associée à chaque tronçon de cours d'eau du réseau surveillé par l'Etat
- Des bulletins d'information locaux rédigés par les SPC (Services de Prévisions des Crues) ainsi qu'un bulletin national rédigé par le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations) décrivant la situation hydrologique actuelle et à venir du réseau surveillé par l'Etat
- Des prévisions quantitatives de hauteur d'eau ou de débit au droit de certaines stations hydrométriques affichées sous forme graphique (Figure 1) ou incluses dans le texte des bulletins rédigés par le SPC.

Les prévisions quantitatives sous forme graphique sont systématiquement expertisées par un prévisionniste et associées à un intervalle de prévision 10-90 %, c'est à dire l'intervalle dans lequel on devrait observer 80 % des valeurs.

Wirwignes (Liane) - Hauteurs - 23/11/2022 10:35

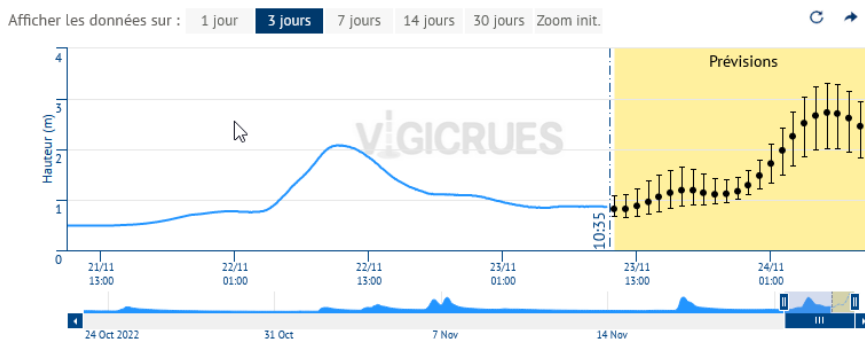


Figure 1 : Exemple de prévision quantitative de hauteur d'eau à la station de la Liane à Wirwignes disponible sur le portail Vigicrues le 25 novembre 2021 (<https://www.vigicrues.gouv.fr>)

- Des emprises de zones d’inondation potentielle caractérisant les zones pouvant être inondées pour différents niveaux de crue référencés par des hauteurs d’eau à des stations hydrométriques.

La question des incertitudes intervient dans la production de tous ces éléments, mais c’est plus spécifiquement sur la production actuelle de prévisions quantitatives probabilistes (assorties d’un intervalle 10%-90%) que va porter cet article.

2. Méthodologie actuelle d’estimation de l’incertitude et production de prévisions probabilistes au sein du réseau Vigicrues

1. Principes

La diffusion de ces prévisions quantitatives est l’étape finale du projet engagé en 2012 au sein du réseau Vigicrues. Les réflexions menées au sein du réseau et avec l’appui d’experts scientifiques ont abouti notamment à plusieurs recommandations (Berthet et al. 2016):

1. La dissociation de la production de la prévision hydrologique de son usage par les gestionnaires de crise;
2. La production de prévision expertisée sous la forme de trois tendances, correspondant à des probabilités au non-dépassement de 10, 50 et 90%;
3. L’intégration de l’information probabiliste dans les outils des gestionnaires de crise;
4. La construction d’outils d’estimation des incertitudes et la production de prévision, même hors périodes de crues et leur évaluation systématique

L’estimation de l’incertitude des prévisions se concentre ici sur ses principales sources : le forçage météorologique et la modélisation (hydrologique ou hydraulique).

Elles sont caractérisées les unes indépendamment des autres (Krzysztofowicz, 1999) puis conjointement prises en compte lorsque le prévisionniste expertise les prévisions avant leur diffusion. L’enjeu est ainsi de définir une estimation juste de l’incertitude totale propre à la prévision diffusée sur le site Vigicrues.

2. Forçages météorologiques

Pour produire la vigilance et les prévisions expertisées, les SPC utilisent différents types de modèles hydrologiques et hydrauliques.

Concernant les modèles hydrologiques, le Schapi assure le développement et la diffusion de deux outils :

- GRP, qui est un modèle global et continu et dont le développement est assuré par l’INRAE (Berthet L. , 2010; Peredo, et al., 2018; Viatgé, et al., 2018)
- la plateforme Plathynes, qui regroupe principalement trois modèles événementiels distribués (MARINE, SCS-Lag&Route et Althaïr)

Ces modèles sont alimentés par des observations et des prévisions de précipitations et d’autres paramètres météorologiques, comme la température de l’air en vue d’estimer la proportion de précipitations solides en zone de montagne, l’ETP pour les approches continues ou l’humidité des sols pour les modèles événementiels.



Concernant les observations de précipitations, on préconise l'utilisation de la lame d'eau Antilope, produite par Météo-France (Laurantin, 2008), issue de la fusion des données des radars et des pluviomètres, même si l'utilisation de lame d'eau radar Panthère ou des pluviomètres reste courante. L'incertitude liée à l'observation des précipitations n'est pas prise en compte.

Concernant les prévisions de précipitations, plusieurs produits sont mis à disposition des services de prévisions des crues.

- Les bulletins précipitation, produits par les Directions Interrégionales de Météo-France. Ces bulletins sont expertisés et comportent des prévisions quantitatives de précipitations pour les jours J, J+1 et J+2, sous forme de cumuls quotidien (Figure 2). Ces prévisions portent sur des zones, dites zones AP-BP, qui ont une surface moyenne d'environ 2000 km² et dont le découpage suit les contours des bassins versants. Les prévisions de la valeur moyenne des précipitations sur chaque zone sont fournies sous la forme d'un intervalle minimum/maximum. Un intervalle de prévision des valeurs maximales locales peut également être fourni en cas de grande disparité spatiale des précipitations prévues.

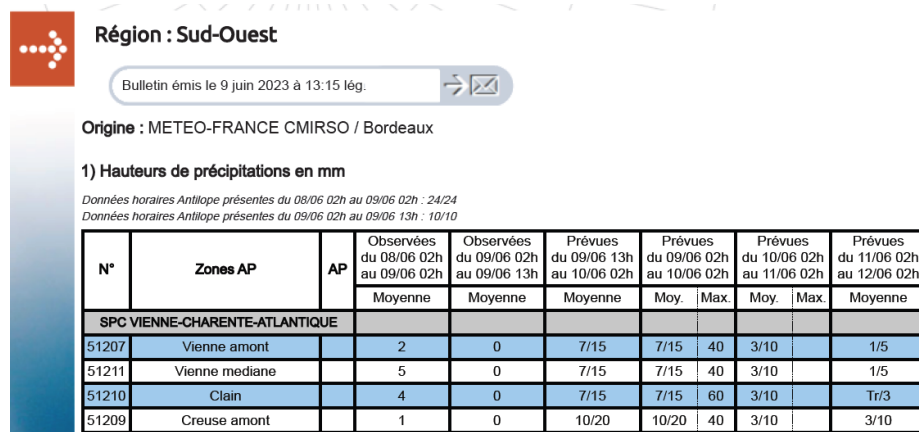


Figure 2 Exemple de bulletin précipitations du 09/06/2023

La largeur des intervalles de prévisions est prédéfinie et dépend de la valeur prévue. Ce produit comporte donc une information sur l'incertitude de la prévision des précipitations, mais les intervalles de prévisions ne sont pas construits comme une information probabiliste ayant l'objectif d'inclure par exemple 80 % des observations et dont on pourrait vérifier la fiabilité.

Des commentaires rédigés par un prévisionniste de Météo-France accompagnent les prévisions quantitatives et portent sur une description de la situation, le comportement des modèles météorologiques et les éventuelles sources d'incertitudes.

- Les prévisions issues de la base Symposium, de Météo-France, remplacées à l'automne 2023 par la nouvelle base de production Alpha.

Il s’agit de prévisions de précipitations spatialisées, intégrées au pas de temps tri-horaire dans les outils du réseau Vigicrues. La résolution spatiale est d’environ 1km². Ces prévisions sont issues de post-traitements des modèles déterministes et ensemblistes de Météo-France et sont supervisées par un prévisionniste.

- Les modèles de prévision numérique du temps déterministes à grande échelle : ARPEGE (Courtier et al., 1991) et à fine échelle : AROME et AROME-IFS (Seity, et al., 2010)

Ces produits de précipitation sont diffusés au réseau via l’outil LAMEDO, déployé au Schapi, qui permet de fournir aux utilisateurs des prévisions spatialisées ou sous forme de statistiques de zones (moyenne sur un bassin versant par exemple), et pour des durées de cumuls paramétrables.

Certains SPC disposent de prévisions de précipitations sous forme probabiliste produite selon la méthode des Analogues. Elles sont utilisées comme forçage météorologique et également comme un signal permettant d’anticiper la survenue d’événements importants, en sollicitant l’expérience du prévisionniste par la fourniture d’événements passés similaires à l’événement prévu (Marty et al. (2023)).

En pratique, les modèles GRP sont souvent alimentés par plusieurs scénarios météorologiques construits à partir du minimum, de la moyenne, du maximum, voire du maximum local prévus dans le BP, répartis temporellement selon les cumuls tri-horaires de Symposium/Alpha. Cette construction permet d’obtenir une estimation de l’incertitude liée aux prévisions météorologiques, sans toutefois constituer une estimation statistiquement fiable de cette incertitude.

De la même manière, les modèles distribués sont le plus souvent alimentés par les prévisions spatialisées Symposium ou par les prévisions déterministes AROME et AROME-IFS.

Notons que les prévisions au-delà du temps de réaction du cours d’eau, nécessitant donc la prise en compte de prévisions de précipitations, sont utilisées comme élément d’aide à la décision concernant les couleurs de vigilance mais font actuellement rarement l’objet de publication de prévisions quantitatives de hauteurs ou de débits assorties d’incertitudes.

3. Estimation statistique de l’incertitude de modélisation par le logiciel Otamin

Le logiciel OTAMIN (OuTil Automatique d’estiMation des INcertitudes prédictives) analyse statistiquement les écarts entre les observations et les sorties de modèles à l’issue de leur calage. Il exploite deux approches, Regression Quantile (Weerts, et al., 2011) et QUOIQUE (QUantification Opérationnelle des Incertitudes par QUantiles de dEbit) développée par Bourgin (Bourgin, 2014), qui peuvent s’appliquer aux débits et aux hauteurs d’eau (Figure 3). Ces statistiques sont ensuite appliquées aux prévisions temps-réel afin d’estimer un intervalle de prévision à 80 % par gamme de débit (hauteur) et par échéance de prévision. Cet outil est utilisé au sein du réseau Vigicrues depuis 2016 afin d’estimer l’incertitude relative à la modélisation hydrologique et hydraulique.

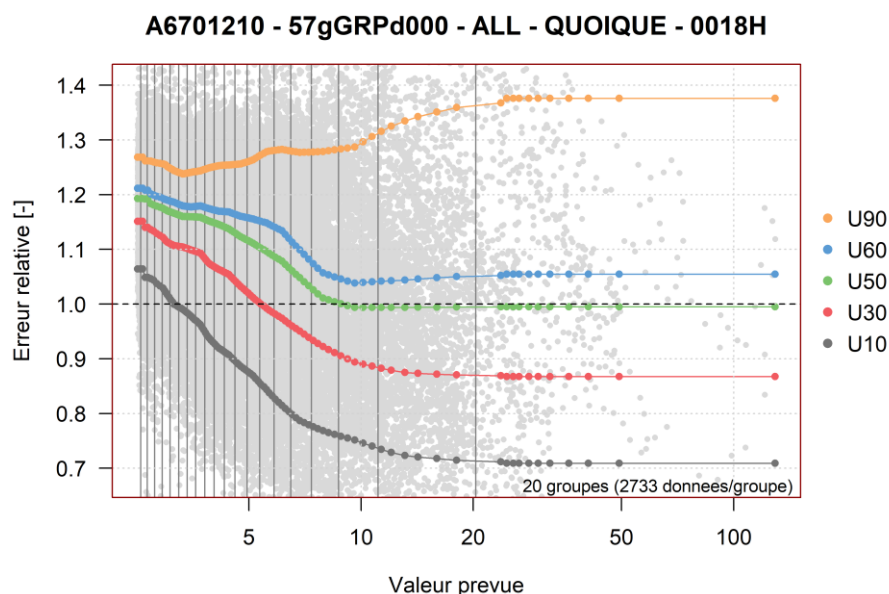


Figure 3 Exemple de graphe de calage OTAMIN avec la méthode QUOIQUE pour le modèle 57gGRPd000 à la station A6701210.

Les abscisses représentent le débit prévu par le modèle, les ordonnées représentent l'erreur relative. Chacun des points gris représente une prévision. Les courbes colorées sont les quantiles estimés de la distribution des erreurs relatives en fonction de la valeur prévue.

Sa mise en œuvre opérationnelle a mis évidence le besoin d'améliorer la finesse des intervalles prédictifs (distance entre les tendances à 10 et 90 %) tout en maintenant une bonne fiabilité des prévisions probabilistes. L'enjeu est donc de mieux spécifier l'échantillon de calage :

- cibler les fortes valeurs pour un usage spécifique à la prévision de crue,
- proposer des conditionnements supplémentaires caractérisant plus précisément la situation de la prévision : saisonnalité, distinction montée de crue/décru.

Il convient également d'étudier la pertinence de ces méthodes d'estimation d'incertitude de modélisation dans un contexte de prévision de crues où on se place souvent dans des situations d'extrapolation lors de crues majeures. Berthet et (2020) soulignent que les choix méthodologiques retenues dans la méthode QUOIQUE (approche non-paramétrique, erreur multiplicative équivalente à une transformation logarithmique) sont les plus pertinentes dans de telles situations mais ne peuvent empêcher, sur certains bassins, une perte significative de performance.

4. Production de prévisions expertisées (EAO)

Le prévisionniste dispose de plusieurs scénarios destinés à représenter l'incertitude du forçage météorologique, alimentant des modèles hydrologiques auxquels sont associés les incertitudes

de modélisation caractérisées par OTAMIN. Ainsi, chaque scénario météorologique génère un scénario déterministe de débit, auquel est rattaché un intervalle prédictif à 80 %.

Par ailleurs, le prévisionniste peut disposer d’informations complémentaires : manœuvres de grands ouvrages hydrauliques, jaugeages en cours d’événement, similarité avec une crue historique connue, autres sources d’incertitudes non prise en compte explicitement...

L’outil EAO (Expertise Assistée par Ordinateur) est conçu pour faciliter l’expression de la vision du prévisionniste sur la situation actuelle et son évolution, par la combinaison des deux principales sources d’incertitudes, tout en lui offrant la possibilité de tenir compte d’éléments externes au système de prévision hydro-météorologique (Figure 4).

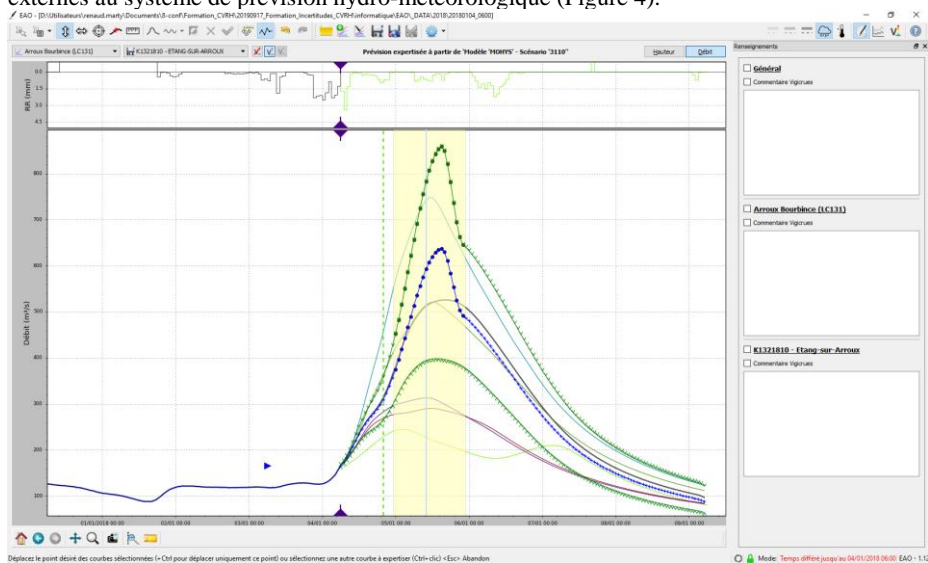


Figure 4 Capture d’écran de l’outil EAO

L’outil initialise l’expertise à partir d’un scénario hydro-météorologique privilégié et des tendances issues du traitement OTAMIN. Le prévisionniste peut ensuite, graphiquement, modifier une ou plusieurs tendances, en amplitude, dans le temps, de façon à déterminer l’incertitude totale de la prévision ainsi expertisée. Le prévisionniste peut également commenter sa prévision, améliorant ainsi la communication au sein de l’équipe de prévisionnistes, la contextualisation de la prévision utile lors de retours d’expérience et aussi vers le grand public via l’affichage de ce commentaire au-dessus de la prévision graphique publiée sur Vigicrues.

La mise en œuvre opérationnelle a mis en évidence le besoin de compléter ces premières fonctionnalités pour permettre au prévisionniste :

- de cibler les pointes de crues dans les secteurs maritimes ;
- de traduire les expertises de débit en hauteur d’eau, grandeur plus adaptée localement par comparaison avec les enjeux potentiellement concernés par le risque inondation ;
- de construire manuellement sa prévision ;
- d’appliquer une incertitude minimale forfaitaire liée aux incertitudes de la mesure hydrométrique ;

- d’afficher la correspondance avec le scénario météorologique privilégié ;
- d’afficher les expertises antérieures au cours du même événement ;
- de transférer par combinaison linéaire des expertises réalisées à des stations amont vers une station aval.

5. Evaluation – Scores

L’évaluation systématique des prévisions est une des recommandations issues des réflexions menées au sein du réseau et avec l’appui d’experts scientifiques entre 2012 et 2014.

La version 1 de l’outil Scores, mise en service en 2015 répond principalement au besoin d’évaluer la performance de modèles déterministes, que ce soit dans un but de connaissance a posteriori ou d’optimisation de leur calage.

A partir de chroniques de débits observés et prévus, cet outil calcule automatiquement certains scores (NSE (Nash & Sutcliffe, 1970), RMSE...), par horizon de prévision.

L’introduction de prévisions accompagnées d’incertitudes a fait évoluer les besoins liés à l’évaluation des prévisions. La version 2 de l’outil Scores, diffusée en 2022, inclut désormais des scores et graphiques destinés à évaluer les prévisions probabilistes : diagramme de Talagrand, CRPS...

3. Perspectives d’évolution pour une généralisation des prévisions hydrologiques probabilistes

1. Objectifs stratégiques

Actuellement, les pratiques sont relativement hétérogènes d’un SPC à l’autre concernant les prévisions quantitatives de hauteur ou de débit, que ce soit en terme de pratique opérationnelle (échéances couvertes, représentation de la dynamique de la crue, production de prévisions en phase de descente...) ou de sélection des stations concernées.

Dans le cadre de son projet stratégique, le réseau Vigicrues a identifié des secteurs à fort enjeu, sur lesquels le service rendu sera renforcé. Sur ces secteurs, l’objectif est de publier des prévisions quantitatives à 24 heures d’échéance lors des épisodes de crues, y compris sur des cours d’eau dont le temps de réaction est inférieur à 24h, et avec un pas de temps suffisamment fin pour représenter la dynamique de la crue (Note technique du 18 janvier 2023).

Pour réaliser cet objectif, des évolutions sont nécessaires dans les outils et les pratiques opérationnelles :

- Construction de chaînes de prévision ensemblistes
- Amélioration de la quantification des incertitudes liées à l’hydrométrie et à la modélisation hydrologique
- Réflexion sur la place de l’expertise, le rôle du prévisionniste et la communication des incertitudes

2. Forçages météorologiques

La généralisation de chaînes de prévisions probabilistes implique l'intégration systématique de prévisions météorologiques d'ensemble. Ces prévisions doivent être constituées d'un ensemble de scénarios cohérents spatialement et temporellement et représenter de façon fiable l'incertitude sur les conditions météorologiques à venir. Idéalement, ces prévisions devraient tenir compte de l'expertise du prévisionniste météorologue.

Ces prévisions météorologiques doivent pouvoir alimenter les modèles utilisés dans le réseau Vigicrues décrits au paragraphe précédent. Pour répondre à tous ces besoins, le réseau devra disposer de prévisions spatialisées à résolution kilométrique et au pas de temps horaire ou infra-horaire.

Plusieurs modèles de prévision d'ensemble sont disponibles. Le système de prévision d'ensemble du CEPMMT (Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, aussi connu sous son acronyme en anglais ECMWF) semble adapté pour la détection du risque à moyenne échéance, tandis que les modèles de prévisions d'ensemble opérés par Météo-France ARPEGE (Descamps, 2015) et AROME (Bouttier, 2016) semblent mieux répondre à l'objectif de publier des prévisions à 24 heures d'échéance.

Les travaux de Taillardat et al. (2020) montrent qu'un post traitement statistique sur ces données permettrait d'en améliorer les performances de façon sensible. Ces travaux sont à l'origine d'une version calibrée de la prévision d'ensemble AROME, qui est également un produit opérationnel. La méthode utilisée permet de conserver la cohérence spatiale et temporelle des scénarios, ce qui permet d'envisager une utilisation en hydrologie.

Les travaux réalisés lors du projet ANR PICS ont montré que l'utilisation de prévisions immédiates (00h-06h) permettait de mieux anticiper les phénomènes de crues soudaines. Courant 2023, les prévisions PIAF (Prévision Immédiate Agrégée Fusionnée) ainsi que les données Arome Prévision Immédiate sont intégrés dans les outils opérationnels du réseau Vigicrues et permettront un suivi plus fin des situations à enjeu. Une version probabiliste de PIAF est en développement et permettra, à terme de mieux appréhender l'incertitude à très courte échéance (Godet, 2023).

La prévision sans couture, qui permettrait d'assurer la transition entre les prévisions immédiates et les prévisions à courte échéance de façon continue est également un sujet de recherche en météorologie qui pourrait avoir des applications directes dans le domaine de la prévision des crues.

Une réflexion est engagée concernant les produits de prévisions météorologiques à intégrer dans les outils opérationnels du réseau Vigicrues, ainsi que sur la meilleure façon de combiner l'information apportée par les prévisions d'ensemble et l'information apportée par les bulletins de précipitation expertisés.

3. Autres sources d'incertitudes

Dans un premier temps, le réseau Vigicrues s'est focalisé sur les deux principales sources d'incertitude, décrites précédemment. La mise en place de prévision sur davantage de cours d'eau requiert d'inclure d'autres sources d'incertitudes afin de mieux caractériser l'incertitude prédictive totale. Une réflexion, débutée fin 2022, met en évidence le besoin de développer des méthodes d'estimation des incertitudes liées à l'initialisation de modèles événementiels,



d'améliorer la prise en compte de la neige et de tenir compte des incertitudes de mesure hydrométrique.

Estimation des incertitudes liées à la mesure hydrométrique

Le réseau Vigicrues applique la méthode BaRatin (Le Coz, 2014) pour estimer l'incertitude liée à la conversion hauteur-débit, qui impacte la modélisation hydrologique lors du calage (hauteur mesurée vers la grandeur modélisée, le débit) et aussi la prévision des impacts terrain (débit prévu vers la hauteur au droit des enjeux). La généralisation de cet outil ouvre des perspectives intéressantes pour mieux caractériser la composante hydrométrique de l'incertitude de prévision.

Estimation des incertitudes liées à la phase des précipitations et à la fonte de la neige

La question de la neige est au cœur des problématiques des bassins de montagne suivis par le réseau Vigicrues. La modélisation de l'évolution du couvert neigeux et de la lame d'eau de fonte repose soit sur une modélisation physique à bilan d'énergie (Vionnet, 2012), soit sur une modélisation conceptuelle à index de température (ex : Cemanège de Valéry (2014)). L'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble offre la possibilité de mieux estimer l'incertitude liée à la neige, par la fourniture de plusieurs scénarios météorologiques équiprobables alimentant les modèles cités précédemment. La prévision de la fonte de la neige est également sensible à la couverture neigeuse et, de manière similaire à la modélisation événementielle (voir ci-après), il est envisagé d'estimer l'incertitude liée à cette condition initiale par la perturbation de cette couverture. L'estimation de l'incertitude totale relative à la neige combinerait alors ces deux approches. Enfin, une attention particulière est à porter sur la cohérence entre le scénario météorologique retenu pour la modélisation de la neige et celui retenu pour la modélisation de débit, que ce soit en analyse ou en prévision, afin d'éviter de prendre en compte plusieurs fois la même précipitation, exagérant alors la prévision hydrologique.

Estimation des incertitudes liées à l'initialisation des modèles événementiels

Pour les modèles événementiels de la plateforme Plathynes et notamment sur le modèle MARINE, Bessière (2008) a mis en évidence la sensibilité particulière du modèle au contenu en eau du sol. Le réseau Vigicrues expérimente par conséquent la prise en compte des incertitudes du modèle par une perturbation dans un intervalle donné de l'humidité initiale ou des paramètres liés à l'initialisation (paramètre S pour le SCS lag&Route et f0 pour ALHTAIR)

Post-traitement statistique des incertitudes de prévision

L'intégration des prévisions d'ensemble incite à revoir la combinaison des estimateurs des incertitudes météorologiques et des incertitudes de modélisation hydrologique. De nombreuses méthodes existent dans la littérature. Parmi celles-ci, Tiberi et al. (2023) proposent une l'estimation de quantiles de prévisions à l'aide de forêt aléatoires et permettent le post-traitement de prévisions d'ensemble hydrologiques. Cette approche s'est révélée prometteuse sur la modélisation hydraulique des cours d'eau côtiers bretons. Une étude est initiée pour l'évaluer sur d'autres bassins et d'autres modélisations hydrologiques.

Commenté [MR1]:

4. Un nouveau cadre d'expression de l'expertise du prévisionniste

Besoin d'adapter les outils aux pratiques des prévisionnistes

L'expérience acquise par la production de prévisions hydrologiques assorties d'incertitudes depuis plusieurs années et sur de nombreux événements de crue met en avant les limites des pratiques actuelles et soulève de nouvelles questions notamment sur le rôle de l'expertise et la place du prévisionniste.

Berthet et al. (2019) expriment le besoin d'assurer une cohérence des prévisions diffusées, sous deux aspects : la cohérence d'un bassin à un autre et la cohérence d'un cycle de prévision à un autre. Dans le premier cas, il s'agit de s'assurer que l'évolution privilégiée sur un bassin est correctement liée à celle retenue sur un bassin voisin. La méthodologie proposée par Bellier et al (2018) est ici applicable grâce à l'arrivée des prévisions d'ensemble. Cette méthodologie consiste à mettre en œuvre des techniques de reconstruction de scénarios afin d'assurer la cohérence spatiale (entre affluents voisins) et temporelle (auto-corrélation) et de pouvoir alimenter des modèles hydrauliques de propagation. Le second cas se réfère à un défaut observé notamment lors des crues du Cher et de ses affluents en 2016 au cours de laquelle il était possible de détecter le changement d'équipe de prévisionnistes.

L'outil EAO est conçu pour permettre aux prévisionnistes de s'assurer que son expertise courante se distingue des précédentes pour des raisons objectives. Dans la pratique, l'affichage des expertises précédentes ne suffit pas : il convient alors de mieux accompagner le prévisionniste dans la priorisation des expertises. Comme le soulignent Berthet et al. (2018), il faut veiller à maintenir la capacité d'analyse et d'interprétation humaine et à bien positionner le prévisionniste dans la chaîne de prévision. En effet, avec la multiplication des stations de prévisions et des scénarios d'entrée, il est illusoire de demander à ce que toutes les prévisions soient expertisées avec une totale attention. Il s'agit ici de proposer aux prévisionnistes des outils et des critères lui permettant définir les expertises à réaliser prioritairement. Faut-il cibler les stations de références ? Les nouvelles prévisions qui se distinguent suffisamment des précédentes ? La présence de grands ouvrages hydrauliques ? Il est à noter que la méthodologie de Bellier et al. (2018) est aussi pertinente pour propager les expertises exprimées par trois tendances, en créant des scénarios cohérents dans le temps et dans l'espace.

Conséquences de l'arrivée de la prévision d'ensemble

L'intégration de modèles de prévision météorologique d'ensemble, les méthodes innovantes de post-traitement et la construction de chaînes de prévisions hydro-météorologiques probabilistes permettront en théorie d'obtenir des prévisions probabilistes fiables de précipitations et de hauteur ou de débit dans les cours d'eau. Dès lors, un des défis qui se posent est « comment le prévisionniste (météorologue ou hydrologue) peut produire une information expertisée, tout en conservant la fiabilité statistique des prévisions ? ».

Un risque induit par l'utilisation systématique de prévisions d'ensemble météorologiques comme forçage pour les modèles hydrologiques est, pour le prévisionniste de crue, de perdre l'expertise sur la prévision météorologique. L'expertise du météorologue, telle qu'elle est réalisée actuellement au travers du BP, ne permet pas d'estimer de façon fiable l'incertitude sur les précipitations à venir. Un travail conjoint entre Météo-France et le réseau Vigicrues doit être

engagé afin d’adapter la production de prévisions météorologiques expertisées pour qu’elle réponde mieux aux besoins de la modélisation hydrologique tout en permettant d’apporter aux prévisionnistes de crues une meilleure compréhension de l’incertitude liée à la situation météorologique et de les aider dans les prises de décisions concernant la vigilance.

Vers de nouvelles formes de communication d’incertitudes adaptées aux contexte de prévision des crues?

La généralisation de l’utilisation de prévisions d’ensemble et la construction de chaînes de prévision probabilistes va nécessiter une appropriation de ces informations par les prévisionnistes météorologues et hydrologues qui produisent les prévisions expertisées, ainsi que par les utilisateurs finaux tels que les gestionnaires de crise ou le grand public.

Le rôle du prévisionniste de crue et l’objectif de l’expertise sur les prévisions de hauteurs d’eau ou de débit dans un contexte probabiliste feront également l’objet d’une réflexion au sein du réseau Vigicrues. Pagano et al (2016) soulignent que la sur-confiance est un biais cognitif qui affecte fréquemment le prévisionniste. Les prévisionnistes, souhaitant améliorer la précision de leurs prévisions, ont tendance à produire des intervalles de prévision trop étroits et à être trop optimistes sur l’incertitude réelle. La question à laquelle il faudra répondre est presque d’ordre stratégique ou politique : la publication de prévisions assorties d’un large intervalle d’incertitude est-elle acceptable ou le prévisionniste doit-il essayer d’affiner cet intervalle, au détriment de la fiabilité ?

L’objectif de la généralisation des prévisions sur les cours d’eau sur les secteurs les plus à enjeux est d’apporter plus d’information pour aider les gestionnaires de crise à prendre les meilleures décisions. Dans les situations de crise, par définition relativement rares, une approche strictement probabiliste et mathématique de l’incertitude est insuffisante. A l’échelle d’une station de prévision, il ne s’agit pas d’optimiser un processus qui se reproduit de nombreuses fois, mais de prendre une décision binaire sur la mise en place d’actions concrètes (mise en place de dispositifs de protection, envoi d’effectifs en renfort, évacuation, etc.). Dans ce contexte, un apport de l’expertise humaine est d’aider l’utilisateur à avoir une meilleure compréhension de la situation : Qu’est-ce qui est sûr ? Quel est le scénario privilégié ? Sur quoi porte l’incertitude ? Quand aura-t-on plus de précisions... L’amélioration de la communication des incertitudes et la rédaction d’un guide pratique sur le sujet est un autre axe de travail pour le réseau Vigicrues.

4. Conclusion

Les travaux effectués depuis 2014 ont permis une mise en œuvre opérationnelle large des recommandations du groupe de travail sur les incertitudes qui s’est réuni entre 2012 et 2014. Cette mise en œuvre passe par le développement d’outils qui permettent la production de prévisions expertisées assorties d’incertitudes et l’adaptation du site Vigicrues, qui est la vitrine permettant d’afficher ces prévisions. Elle s’appuie aussi sur l’adoption de méthode communes et sur la montée en compétences des prévisionnistes par le biais d’une formation dédiée. L’objectif de publier de façon systématique sur les zones à plus fort enjeux des prévisions quantitatives assorties d’incertitudes à 24 heures d’échéance lors des épisodes de crues avec un

pas de temps suffisamment fin pour représenter la dynamique de la crue est un objectif ambitieux. Il nécessitera la généralisation de chaînes de prévisions météorologiques, hydrologiques, hydrauliques ensemblistes. Cette généralisation passe par la mise à disposition du réseau Vigicrues de produits de prévisions d'ensemble météorologiques, des améliorations méthodologiques et une prise en compte plus large des sources d'incertitudes. Cette généralisation renforce également la nécessité d'accompagner ces prévisions probabilistes et de réfléchir à la place de l'expertise.

5. Références

- Bellier, J. Z. (2018). Generating coherent ensemble forecasts after hydrological postprocessing: Adaptations of ECC-based methods. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/2018WR022601>
- 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. <https://hal.inrae.fr/tel-02594604>
- Berthet, L. G.-S. (2016). Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information. *La Houille Blanche*.
<https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>
- Berthet, L. L. (2019). Cohérence des prévisions et place de l'expertise : les nouveaux défis pour la prévision des crues. *La Houille Blanche*. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019001>
- Berthet, L., Bourgin, F., Perrin, C., Viatgé, J., Marty, R., & Piotte, O. (2020). A crash-testing framework for predictive uncertainty assessment when forecasting high flows in an extrapolation context. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2017-2020>
- Bessière, H. (2008). Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique. Thèse de doctorat, Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse.
<http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000710/>
- Bourgin, F. (2014). Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? : Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat. AgroParis Tech
<https://pastel.hal.science/tel-01130084v2>
- Bouttier, F. R. (2016). Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* <https://doi.org/10.1002/qj.2622>
- Courtier, P., Freydl, C., Geleyn, J., Rabier, F., & Rochas, M. (1991). 'The ARPEGE project at Météo-France'. *ECMWF Seminar Proceedings*.
<https://www.ecmwf.int/en/eLibrary/74049-arpege-project-meteo-france>
- Descamps, L. L. (2015). PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* <https://doi.org/10.1002/qj.2469>
- Godet, J. P. (2023). Assessing the ability of a new seamless short-range ensemble rainfall product to anticipate flash floods in the French Mediterranean area. *EGU sphere*.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-907>
- Krzysztofowicz, R. (1999). Krzysztofowicz R. (1999) – Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/1999WR900099>
- Laurantin, O. (2008). ANTILOPE: Hourly rainfall analysis merging radar. *Proceedings of the International Symposium*. Grenoble.
- Le Coz, J. R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016>

- Marty, R. G. (2023). Les Analogues, une approche statistique adaptée pour la prévision opérationnelle des crues et étendue à l'ensemble de la France. Colloque SHF “*Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives*”. Toulouse.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pagano, T. C. (2016). Automation and human expertise in operational river forecasting. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. <https://doi.org/10.1002/wat2.1163>
- Peredo, D., Viatgé, J., Vrignaud, C., Riffiod, F., Marty, R., Berthet, L.,... Perrin, C. (2018). Le modèle hydrologique GRP a-t-il été fiable et utile lors des récentes crues sur les bassins de la Seine et de la Loire ? Actes de la Conférence SHF « De la prévision des crues à la gestion de crise ». Avignon.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Masson, V. (2010). The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Weather Rev.* <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Taillardat, M. (2020). From research to applications--examples of operational ensemble post-processing in France using machine learning. *Nonlinear Processes in Geophysics*. <https://doi.org/10.5194/npg-27-329-2020>
- Valéry, A. A. (2014). ‘As simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>
- Viatgé, J., Pinna, T., A., F., Perrin, C., Dorchies, D., Tilmant, F. (2018). Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. Actes de la Conférence SHF « De la prévision des crues à la gestion de crise ». Avignon.
- Vionnet, V. B.-M. (2012). The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geosci. Model. Dev.* <https://doi.org/10.5194/gmd-5-773-2012>
- Weerts, A. H., Winsemius, H. C., & Verkade, J. S. (2011). Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression: examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales). *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-255-2011>