

PRODUCTION ET MISE A DISPOSITION D'INFORMATIONS SUR LES CRUES : FOCUS SUR UNE DÉCENNIE DE DÉVELOPPEMENTS AU SERVICE DE PRÉVISION DES CRUES LOIRE-ALLIER-CHER-INDRE

Production of flood informations :

Focus on decade at regional flood forecasting center Loire-Allier-Cher-Indre

Auteurs : FAUCARD Yoann^{1*}, MARTY Renaud¹, HANS Pierre-Adrien¹

** auteur correspondant*

¹Service de prévision des crues Loire-Allier-Cher-Indre (SPC LACI) – DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon - Orléans, France,

E-mail : yoann.faucard@developpement-durable.gouv.fr, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr, pierre-adrien.hans@developpement-durable.gouv.fr

Résumé : Depuis sa création en 2005, le SPC Loire-Allier-Cher-Indre (SPC LACI) s'est doté de différents documents de stratégie générale. Le premier, datant de 2007, portait plus spécifiquement sur la modélisation avant que les suivants et en particulier à partir de 2012 aient élargi le panorama offert en balayant non seulement la seule modélisation mais également en donnant une nouvelle importance aux aspects opérationnels : l'implémentation/structuration des outils pour leur utilisation par les prévisionnistes que dans la diffusion d'information vers ses bénéficiaires, ainsi que le volet sur la connaissance et prévision des inondations, complément indispensable à la prévision des crues.

Mots-clefs : estimation des incertitudes, expertise des prévisions, prévision opérationnelle, cartographie des zones inondables, partage de l'information.

Abstract : Since his creation in 2005, the regional flood forecasting center Loire-Allier-Cher-Indre (LACI) has adopted various general strategy documents. The first, established in 2007, focused specifically on modeling before the following ones and particularly from 2012 widened the panorama offered by sweeping not only the modeling but also by giving a new importance to the operational aspects both in the implementation/structuring of tools for their use by forecasters and in the dissemination of information to his beneficiaries, as well as the sections on flood zones mapping knowledge and forecasting, an essential complement to flood forecasting.

Keywords: uncertainty estimation, forecasting expertise, operational forecast, flood zones mapping, information sharing

1. DEVELOPPEMENTS DES CAPACITES DE PRODUCTION

1.1 Une modélisation adaptée au contexte hydrologique

Le territoire du SPC LACI offre des réponses hydrologiques variées, propres aux reliefs, aux régimes pluviométriques et à l'organisation du réseau hydrographique. Sur les têtes de bassin, il est indispensable de prendre en compte des grandeurs météorologiques (précipitations, températures), qu'elles soient observées ou prévues, pour anticiper l'évolution des débits et des hauteurs dans les cours d'eau. Sur les portions de cours d'eau à propagation, considérer les débits observés et prévus en un ou plusieurs sites hydrologiques amont est suffisant pour prévoir l'évolution à l'aval.

Différentes typologies de modèles sont logiquement utilisées, car elles répondent à ces contextes hydrologiques spécifiques. Les têtes de bassins sont riches en modèles hydrologiques de type pluie-débit. L'essor de cette modélisation commence avec l'arrivée du modèle GRP développé par Berthet (2010) : le bassin de l'Indre fut ainsi le premier couvert (Marty et al, 2019). Dans un premier temps ces modèles ont été calés aux sites hydrologiques où est caractérisée la vigilance crue et où l'évolution future des débits est majoritairement dépendante des précipitations (ex : la Loire à Bas-en-Basset, l'Allier à Prades). La couverture de la modélisation s'étend progressivement aux affluents des grands cours d'eau. Cela comprend également les secteurs influencés par la neige grâce à l'intégration du module Cemaneige dans GRP (Valery, 2010) : les cours d'eau venant des Monts du Cantal, du massif du Sancy sont ajoutés dans le système de prévision en 2017. Par ailleurs, les bassins caractérisés par une forte variabilité spatiale des précipitations ou les bassins intermédiaires non jaugés contribuant aux ondes de crues nécessitent une modélisation pluie-débit adaptée. A partir de 2018, la modélisation GRP est complétée par la modélisation Plathynes sur l'amont de la Loire, sur la Besbre et l'Indre intermédiaire.

Sur les secteurs plus à l'aval, les modèles hydrauliques ou à propagation simple (déformation et translation d'hydrogrammes), de type débit-débit sont prépondérants. Les grands ouvrages hydrauliques sur la Loire, le Lignon du Velay, la Sioule et le Cher font l'objet d'une modélisation spécifique afin d'anticiper avec réalisme le remplissage des retenues « statiques » ou les manœuvres des gestionnaires d'ouvrage. Le premier modèle hydraulique a été déployé en 2010 sur la Loire moyenne et depuis tous les grands axes (Loire, Allier, Cher et Indre) ont été couverts.

A ce jour près de 160 sites hydrologiques sont ainsi couvertes par au moins un modèle de prévision dont 93 de type GRP, 4 de type Plathynes, 65 de type propagation simple et 20 de type hydraulique.

1.2 Cartographies de l'aléa inondation

La prévision des inondations consiste à fournir une traduction concrète de l'impact d'une crue sur un territoire donné. Ambition majeure du réseau VIGICRUES depuis sa création, les pré-requis et éléments de doctrine ont été partagés en 2011. Les données disponibles sur le territoire LACI ont permis au SPC de s'investir dans la production de scénarios d'aléas dès 2012, principalement en régie. Les premiers aléas ont été produits sur l'Indre (2013) et le Cher (2013-2016), basés sur l'exploitation des repères de crues et la reconstitution des lignes d'eau passées. Cette période a donné lieu à des avancées méthodologiques pour la cartographie, ainsi que le développement d'outils géomatiques dédiés. Le plugin QGIS cartoZI (Escudier et al, 2016a) a ainsi été développé dès 2014 par le SPC, dont les utilitaires simplifient la construction d'une nappe d'eau, puis le calcul des hauteurs d'eau et le lissage des couches produites.

La modélisation hydraulique s'est ensuite rapidement imposée pour augmenter le patrimoine de scénarios. Initialement dédiée à la prévision de crues, la vocation des modèles hydrauliques du SPC a alors évolué à partir de 2015, lorsque le SPC a pris en compte le besoin cartographique dans la conception de ses modèles hydrauliques de prévision. Les objets décrivant les lits majeurs ont été progressivement densifiés pour faciliter l'exploitation cartographique, passant de modèles intégrant quelques dizaines de casiers au début des années 2010 à des modèles à plusieurs milliers de mailles 2D à la fin de la décennie.

Mi-2023, le territoire du SPC LACI est couvert par plus de 300 scénarios d'aléas, produits en régie ou bien dans le cadre des études relatives aux révisions des Plans de Prévention du Risque Inondation, conduites par les DDT. Ces données concernent environ 1 800 km de cours d'eau, soit les 2/3 du linéaire surveillé. Elles sont stockées dans la base nationale VIGINOND (Escudier et al, 2016b).

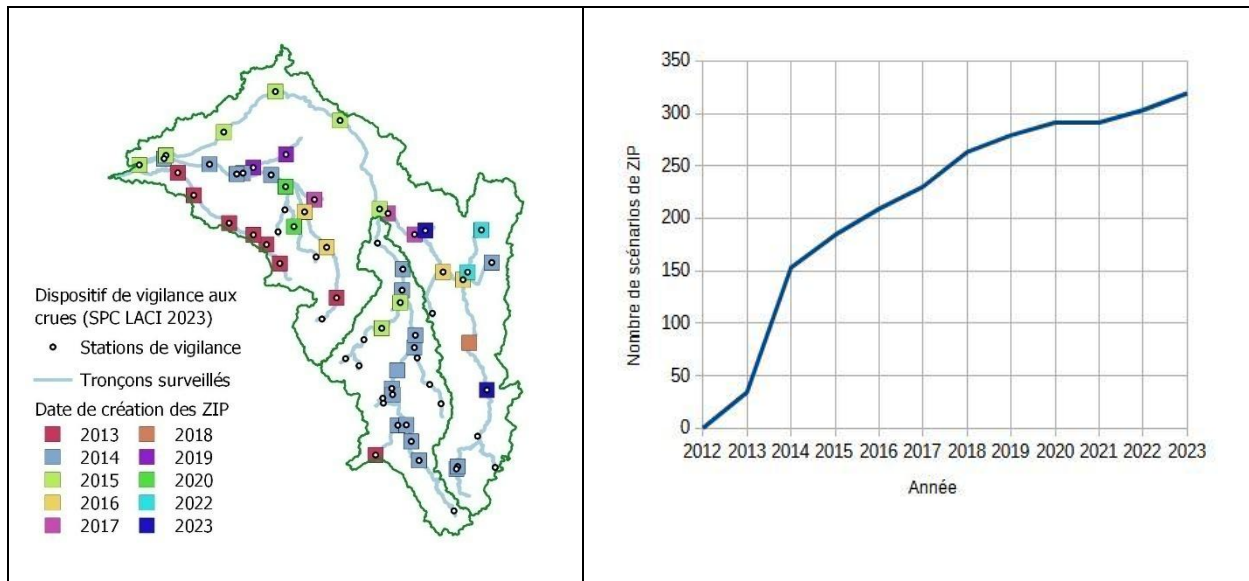


Figure 1 : Production de scénarios de ZIP entre 2013 et 2023

1.3 Intégration des développements dans la chaîne opérationnelle

Assez rapidement le rythme de déploiement des modèles de prévision a conduit le service à revoir sa manière d'intégrer les développements dans sa chaîne opérationnelle et en améliorer sa structure. Pour favoriser les échanges entre les différents modèles, permettre leur enchaînement de l'amont vers l'aval en évitant de nombreux fichiers et traitements intermédiaires, une base de données centralisant l'ensemble des prévisions a été créée. Outre le fait de standardiser les requêtes d'import et export pour l'ensemble des outils de la chaîne opérationnelle, elle a permis de pouvoir facilement extraire, post-crise, les prévisions produites. Relativement simple, sa structure est restée globalement stable au fil des années, les seules évolutions étant plutôt des ajouts de nouvelles données venant enrichir les prévisions de débits. On peut citer par exemple l'ajout des données de lames d'eau utilisées, à la fois observées et prévues, par les modèles hydrologiques ainsi que les sorties simulées sur les quelques jours qui précèdent l'instant de prévision. Ces données sont précieuses pour ré-analyser les séries ou même rejouer les événements lors d'exercices de formations, temps nécessaires dans la préparation à la gestion de crise (Marty et al, 2019).

Le traitement et visualisation de toutes les prévisions bancarisées a été ensuite rendu possible par le développement d'un superviseur en 2014, élément central de la chaîne opérationnelle des prévisionnistes, pour effectuer leurs tâches quotidiennes de supervision et prévision. Cet outil a régulièrement évolué pour répondre aux exigences techniques des prévisionnistes et aux productions attendues d'un service de prévision des crues : pilotage des modèles, visualisation des résultats et diffusion des informations.

En ce sens, voyant la nécessité grandissante de diffuser des prévisions graphiques et avec l'émergence du projet national « Prévision 2015 » (voir Berthet et al, 2016), l'envoi de documents de synthèse, en pièces jointes au bulletin de vigilance, et présentant les graphes de prévisions aux différentes stations diffusées par tronçons de vigilance a remplacé les tableaux de valeurs chiffrées, n'offrant qu'une information partielle de la situation. Les prévisions ainsi diffusées sont présentées depuis 2015 sous la forme d'un fuseau d'incertitudes. D'abord forfaitaires, ces incertitudes ont ensuite pu être quantifiées grâce à différentes méthodes déployées au SPC, décrites ci-après.

2 EVOLUTION DES PRODUITS DIFFUSES

2.1 Incertitudes : caractérisation et propagation

Berthet et al. (2016) soulignent que l'estimation des incertitudes propres aux prévisions hydrologiques sont « indispensables pour une prise de décision éclairée » et recommandent donc l'implémentation d'outils d'estimation automatique des incertitudes. Aujourd'hui, la caractérisation des incertitudes de prévision se concentre sur les deux principales sources :

- Les incertitudes de la prévision météorologique selon une approche multi-scénario alimentée par les prévisions de Météo-France, les prévisions par analogie (à partir de 2010 et limitée à la Loire en amont de Bas-en-Basset et à l'Allier en amont de Vieille-Brioude, Marty et al, 2023), voire un scénario manuel construit par le prévisionniste ;
- Les incertitudes de la modélisation par l'outil OTAMIN qui traduit statistiquement les écarts passés entre observations et prévisions, et les appliquent à la prévision courante pour proposer trois courbes quantiles (10, 50 et 90%), appelées tendances.

La caractérisation des incertitudes de modélisation par OTAMIN débute en 2017 par la modélisation pluie-débit GRP qui, en raison de son fonctionnement en continu, fournit suffisamment de données. Elle est depuis appliquée aux modélisations hydrauliques (HYDRA, MASCARET) et à propagation simple (MOHYS). Ces derniers disposent d'une méthode de recalage à la dernière valeur observée (recalage constant, recalage progressif sur une certaine durée avant de retrouver la prévision brute). OTAMIN est ainsi appliquée dans les trois cas d'application afin de se conformer à l'usage opérationnel. Cela nécessite alors de reconstruire des simulations recalées à partir des simulations brutes issues du calage. Au final, seuls les modèles de barrages ne sont pas encore couverts. Il est important de noter ici que l'application d'OTAMIN est une étape indispensable dans le processus de calage d'un modèle hydrologique ou hydraulique : ce dernier ne peut être implémenté dans le système opérationnel si cette étape n'est pas accomplie.

En tête de bassin, les prévisions hydrologiques sont expertisées à partir de plusieurs scénarios météorologiques, de plusieurs modèles auxquels sont associées les incertitudes estimées par OTAMIN aboutissant à la production de prévisions expertisées sous la forme trois tendances. Sur les secteurs plus à l'aval, cette approche demeure insuffisante pour « retranscrire » vers l'aval les incertitudes totales de prévision que ne peuvent résumer les prévisions déterministes de chaque site hydrologique amont. Le SPC LACI a développé l'approche « PROPAG » qui consiste à considérer les tendances associées aux prévisions déterministes comme étant des scénarios hydrologiques. Même si, pour être rigoureux, une tendance (ensemble de valeurs statistiques reliées temporellement) ne doit pas être assimilée à un scénario (ensemble de valeurs physiquement cohérentes temporellement), cette approche permet de propager les incertitudes totales de chaque site amont à l'aval. Il est à noter qu'elle peut aussi aboutir à une exagération de l'incertitude totale prédictive au site hydrologique aval. L'approche PROPAG ne tient pas compte de l'incertitude de modélisation du modèle de propagation et vient en complément à l'incertitude issue d'OTAMIN. En raison des temps de propagation des ondes de crue depuis les sites amont vers le site aval, les tendances sont confondues aux premières échéances.

2.2 Expertise et diffusion graphique

Chaque prévision issue d'un modèle de prévision est systématiquement entachée d'incertitudes générées par les diverses méthodes ci-dessus : la phase d'archivage dans l'environnement opérationnel comporte systématiquement le passage des séries déterministes dans OTAMIN pour tous les modèles et PROPAG pour les seuls modèles hydrauliques. Chacune des méthodes possède des biais et limites mais elles sont complémentaires et utiles à l'analyse du prévisionniste : in-fine, celui-ci exprime son expertise en intégrant ces estimations d'incertitudes ainsi que d'autres informations complémentaires

dont il peut disposer en temps-réel. Viatgé et al. (2019) présentent les principes méthodologiques de cette démarche et l'illustrent au travers des prévisions sur des affluents de la Loire bourguignonne lors des crues de janvier 2018. La mise à disposition par le SCHAPI de l'outil EAO/EXPRESSO, (outil décrit par Berthet et al, 2016-b), a rendu cette tâche plus aisée en offrant la possibilité de modification graphique des différentes tendances basse, centrale et haute pour combiner et traduire l'incertitude finale de la prévision à l'instant de sa production.

La chaîne opérationnelle du SPC est en constante évolution pour intégrer ces nouveautés technologiques et méthodologiques, en cherchant toujours le juste équilibre entre traitements automatiques et expertises humaines pour optimiser l'efficacité des actions en gestion de crise et maintenir la capacité de porter, auprès des gestionnaires de crise, la situation et son évolution appréciées par le prévisionniste. Un mode automatique est aujourd'hui en place, s'exécute chaque jour, et fournit au prévisionniste des premiers résultats et ordres de grandeur pour préparer son bulletin de vigilance. Des choix de pré-validation permettant l'enchaînement de la modélisation ont dû être réalisés : les incertitudes des sorties des modèles hydrologiques à l'amont sont basées sur les fourchettes moyennes prévues par Météo-France dans ses bulletins de précipitations puis propagées dans les modèles aval. Ainsi une photographie de la situation hydrologique prévue est rapidement disponible pour se focaliser sur les secteurs à risque et approfondir l'analyse hydrologique. Appui au prévisionniste, ce mode de fonctionnement n'a pas pour but de le remplacer, aussi des précautions ont été mises en place pour éviter la diffusion de ces prévisions pré-validées automatiquement. Un statut des prévisions a ainsi été ajouté dans le référentiel opérationnel :

- le statut « brut » correspond à une sortie d'un modèle sans aucune action ;
- le statut « pré-validé » est affecté aux choix automatique et paramétré pour l'enchaînement du mode automatique (ces deux premiers statuts ne sont pas diffusables vers l'extérieur au SPC) ;
- le statut « validé » correspond au choix d'une prévision par le prévisionniste sans modification graphique des tendances (un simple contrôle visuel) ;
- le statut « expertisé » correspond au choix d'une prévision par le prévisionniste avec ici modification graphique des tendances.

Les prévisions ainsi produites sont diffusées graphiquement sur VIGICRUES depuis la mi-2017 directement à la suite des données observées aux stations. Près de 100 stations sont ainsi diffusées à ce jour sur le territoire du SPC lors des épisodes de crues. Les délais de prévision diffusés au grand public ont généralement été calés aux temps de réponse des bassins versants sur les stations en tête de bassin disposant de modèles hydrologiques et aux temps de propagation sur les axes des cours d'eau plus à l'aval. Ce choix initial tendait à limiter l'incertitude météorologique dans la diffusion graphique. Toutefois, certains territoires à forts enjeux nécessitent une anticipation de plusieurs jours afin de mener à bien l'évacuation préventive des populations. Des prévisions à plus longue échéance, jusqu'à près de 4 jours sur la Loire moyenne où sont localisés les secteurs les plus à risque, sont diffusées en complément par courriel aux gestionnaires de crise.

A la suite des crues de mai-juin 2016 sur le Cher, et son retour d'expérience avec les gestionnaires de crise notamment, un travail de rationalisation des instants de production/diffusion des prévisions a été réalisé. Si la rapidité des bassins cévenols impose une fréquence de diffusion importante, fixée toutes les 4h, les secteurs plus à l'aval plus lents peuvent se limiter à 2 ou 3 diffusions par jour, tant pour un suivi de la situation que pour plus de lisibilité et digestion des informations par les partenaires.

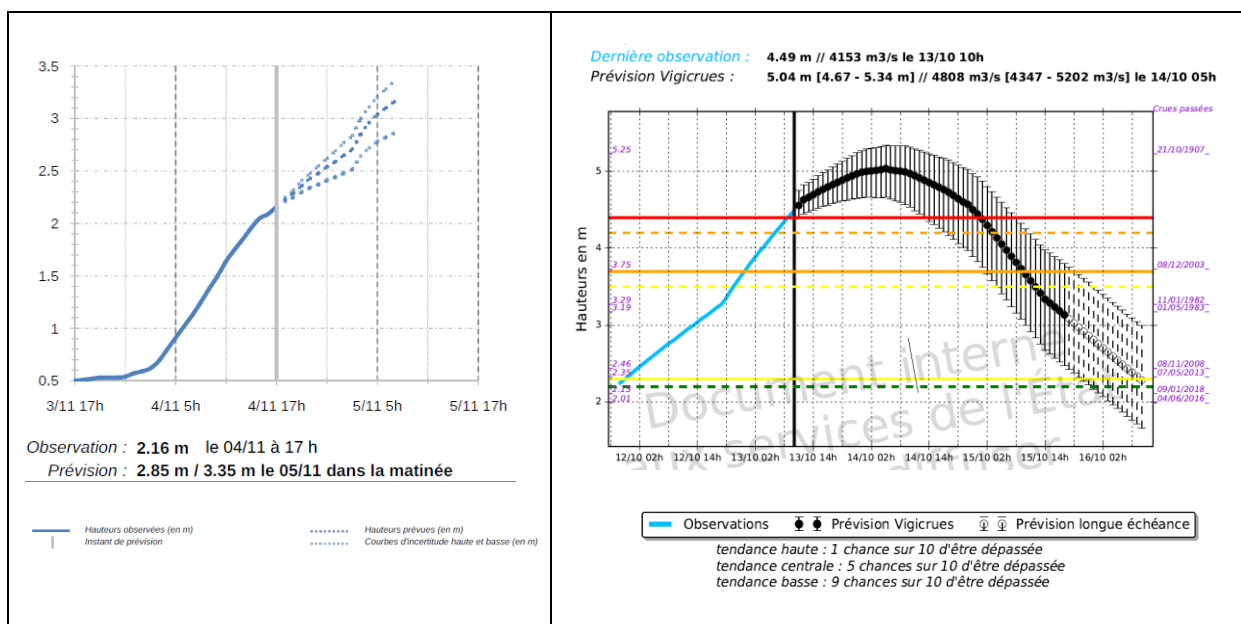


Figure 2 : Evolution de la diffusion de prévisions graphiques « internes » entre 2013(à gauche) et aujourd'hui (à droite)

2.3 De la prévision graphique à la prévision des inondations

La prévision des inondations a été pensée pour une utilisation opérationnelle. Le référencement de chaque scénario à une hauteur à une station donnée doit permettre de faire le lien entre la prévision diffusée par le SPC. Aucun scénario préétabli ne pourra représenter parfaitement la situation : la hauteur maximale prévue sera généralement différente des hauteurs des scénarios disponibles ; la dynamique de la crue peut être différente des scénarios modélisés ou reconstitués. L'inondation prévisible doit donc être encadrée par un scénario minorant et un scénario majorant, permettant ainsi aux gestionnaires de crise d'évaluer au mieux les moyens à déployer. Le SPC diffuse ainsi depuis 2015 aux missions RDI concernés par un tronçon en vigilance jaune ou supérieure un bulletin dédié à la prévision des inondations. Ce bulletin est diffusé à chaque cycle de prévisions, jusqu'à ce que le pic de crue soit passé sur l'ensemble du tronçon de vigilance. Il indique les références de cartes à utiliser préférentiellement pour encadrer l'événement en cours.

Le choix des scénarios s'appuie sur les données observées et prévues, et leurs incertitudes. En montée de crue, seul un scénario minorant est recherché jusqu'à identification du maximum dans le délai de diffusion. Il s'agit du scénario le plus proche du bas du fuseau d'incertitude de prévision et inférieur à la prévision centrale. Dès que le maximum est visible dans le délai de prévision, un scénario majorant est également recherché, se rapprochant au plus près du haut du fuseau d'incertitude de prévision.

Le prévisionniste peut expertiser et modifier les choix automatiques et ajouter des précisions complémentaires, notamment pour des événements atypiques, où les scénarios peuvent être mis en défaut. Les crues de mai-juin 2016 ont par exemple engendré des niveaux d'eau plus importants dans les zones rurales en raison de la végétation développée à cette période que ce qui était attendue d'après les modélisations en configuration hivernale.

3 CONTROLE DE LA QUALITE DES INFORMATIONS DIFFUSEES

3.1 Evaluation des prévisions

Berthet et al. (2016) recommandent de procéder régulièrement à l'évaluation des prévisions et de leurs incertitudes associées. Ils soulignent le besoin de développer des méthodes d'évaluation à l'échelle d'un événement et de grandes régions en raison des effectifs logiquement modestes dans le cadre de la prévision de crues modérées à rares.

Si après chaque évènement, une analyse de l'adéquation entre la couleur de vigilance émise et celle réellement observée a toujours été systématiquement réalisée, les premières évaluations de prévisions sont apparues suite aux nombreux événements survenus sur la Loire au cours de l'automne 2014. Elles ciblent la précision (écart moyen entre la tendance centrale et l'observation) et la fiabilité (cohérence entre les probabilités annoncées, 10-50-90 et les fréquences d'occurrence relevées aux cours de l'évènement). Elles ont mis en évidence la bonne adéquation des tendances hautes et centrales sur les sites hydrologiques à enjeux. Les tendances basses sont majoritairement surestimées. Elles montrent aussi la difficulté d'une telle démarche en raison de la forte sensibilité à la quantité de prévisions diffusées. Les mêmes constats sont établis au cours de l'évaluation menée suite aux crues de mai-juin 2016 sur le bassin du Cher.

En 2022, le SPC LACI entame une réflexion pour formaliser l'évaluation des prévisions expertisées lors d'événements de crue, afin de contrôler systématiquement la qualité des informations mises à disposition et de permettre aux prévisionnistes d'accéder facilement à ces analyses. Les principaux choix méthodologiques sont, pour un site hydrologique donné :

- le regroupement d'échéances de prévision selon un temps hydrologique caractéristique (temps de réponse ou temps de propagation) afin de faciliter la comparaison des performances sur des bassins aux dynamiques variées, et de lisser les résultats qui sont très sensibles à l'échantillonnage ;
- l'évaluation de la fiabilité reposant sur les diagrammes de rang et de fiabilité (Jolliffe et al., 2011): l'indicateur retenu est le taux réel de couverture de l'intervalle prédictif à 80%, délimité par les tendances basses et hautes, en considérant que les valeurs acceptables se situent entre 70 et 90% ;
- la détermination de la précision des prévisions obtenues à partir de différents critères numériques de distance (erreur quadratique moyenne, erreur absolue moyenne...). Ceux-ci sont appliqués sur la tendance centrale et l'acceptabilité dépend de la nature du site hydrologique (têtes de bassin ou secteur à propagation) ;
- la construction d'un indicateur sur les pointes de crues, inspiré du Peak-Box de Zappa et al. (2013). L'acceptabilité en écart temporel et en valeur de débit de point est propre à la nature du site hydrologique.

Cette méthodologie est appliquée par Nicolas et al. (2023) pour évaluer les prévisions expertisées émises quotidiennement sur la Loire par les SPC LACI et Maine-Loire aval (MLA) depuis 2017. Ces développements permettent notamment d'intégrer l'évaluation des incertitudes de prévision dans les retours d'expérience établis après chaque crue significative et des débriefings post-crues destinés aux prévisionnistes. Les résultats seront prochainement intégrés au processus qualité mis en place au sein de la DREAL Centre-Val de Loire portant spécifiquement sur la prévision des crues.

3.2 Reconnaissances terrain

La pertinence des cartographies d'inondation existantes doit être évaluée après un événement. Cette évaluation passe par la collecte d'informations sur le terrain, afin de comparer l'aléa prévisionnel avec l'aléa réellement observé. À la suite des crues de mai-juin 2016, le SPC a investi dans du matériel (DGPS, tablettes, marqueurs) et a progressivement formé ses prévisionnistes pour les mettre en capacité de réaliser des reconnaissances post-inondation. Une note organisationnelle interne au SPC est en place depuis 2020. Le guide méthodologique¹ produit en 2017 par le CEREMA préconise la mise en place de protocoles locaux préalables. En 2018, la note technique relative à l'organisation des missions RDI a renforcé l'intérêt des DDT à s'investir sur ce sujet. Depuis 2020, le SPC a ainsi formé la plupart des DDT de son territoire à la recherche et au référencement des laisses de crues. Il leur a également fourni des outils adaptés à la collecte d'informations sur le terrain, notamment des projets exploitant l'outil QField.

En 2023, le SPC ambitionne de créer un protocole formalisé sur la partie de son territoire se situant en région Centre-Val de Loire. Limité dans un premier temps aux DDT, il pourra dans les années suivantes être élargi aux autres acteurs du territoire, notamment les collectivités locales, et avoir recours à des prestations externalisées.

4 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

Les outils et méthodes d'estimation de l'incertitude totale des prévisions à disposition des prévisionnistes sur les secteurs pluie-débit ne sont pas totalement adaptés au contexte de prévision avec incertitudes puisque les scénarios ne sont pas associés à des probabilités. Dans les secteurs à propagation, les scénarios d'entrée ont des défauts liés à l'utilisation de tendances statistiques pouvant aboutir à une estimation exagérée de l'incertitude. L'amélioration de la méthode PROPAG nécessite la construction de scénarios hydrologiques spatio-temporellement cohérents à partir des tendances expertisées aux sites amont. L'intégration des prévisions d'ensemble et des analogues étendues à la France, offre la perspective d'appliquer la méthode développée par Bellier et al. (2018) qui génère de tels scénarios après un post-traitement statistique en intégrant les prévisions d'ensemble initiales.

Depuis l'automne 2022, le SPC LACI utilise des prévisions d'ensemble pour alimenter son bulletin de prévision de risque hydrologique : encore en phase de test, son objectif est de fournir aux référents départementaux inondations une probabilité d'atteinte de vigilance sur chaque tronçon réglementaire à des échéances plus lointaines que celle sur VIGICRUES qui est limitée aux prochaines 24 heures. Les échéances ainsi proposées vont de J+2 à J+5 dans le but de permettre aux gestionnaires de crise d'anticiper une éventuelle mobilisation notamment à l'approche du week-end. Les échéances J et J+1 ne sont volontairement pas représentées puisque déjà couvertes par la vigilance « crues » directement accessible sur VIGICRUES. Ce premier usage met en évidence la capacité du système de prévision à utiliser un grand nombre de scénarios. Il est actuellement limité à la visualisation mais peut fournir une information complémentaire au prévisionniste en amont de son expertise. L'articulation entre le système déterministe et ensembliste est à inventer pour assurer la meilleure cohabitation possible.

¹https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/agj_collecteinformations_inondation_guide_6sept17_cle_0c83e7.pdf

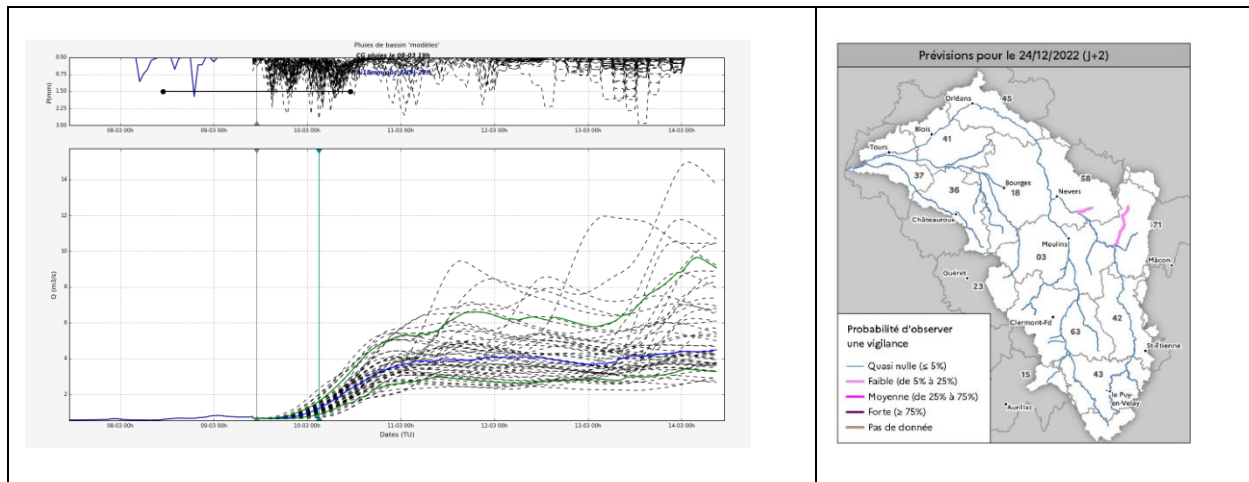


Figure 3 : Exemple de sortie d'un run « ensembliste » à une station et carte de probabilité à une échéance donnée pour le bulletin de prévision du risque hydrologique

L'arrivée progressive des prévisions d'ensemble est une piste évidente de progrès puisqu'elle propose des scénarios équiprobables cohérents dans le temps (auto-corrélation) et dans l'espace (d'un bassin à l'autre). Elle bouscule cependant les habitudes des prévisionnistes en offrant une multitude de scénarios qu'il conviendra de post-traiter en amont de son travail d'analyse et d'expertise : l'application d'OTAMIN en explorant davantage de quantiles, permettrait alors d'habiller les scénarios hydrologiques, en s'inspirant par exemple du BMA (Bayesian Model Averaging, Raftery et al., 2005) et de lui fournir alors l'incertitude prédictive de façon plus explicite. Cette phase technique sera accompagnée par un accompagnement et une formation des prévisionnistes dédiés à l'utilisation de ces nouvelles données.

En outre, les prévisions probabilistes produites par la méthode des Analogues ne seront plus limitées au Massif Central grâce à l'application de cette adaptation statistique à l'ensemble du territoire LACI (Marty et al., 2023). Bellier et al. (2017) soulignent que cette approche est complémentaire à la prévision d'ensemble et peut aider à corriger les biais et les défauts de dispersion.

Enfin, devant la multiplicité des techniques d'estimation des incertitudes, il serait intéressant de suivre la méthodologie proposée par Bellier et al. (2021) facilitant la sélection des éléments du système de prévision à améliorer en priorité. Les nouvelles techniques et les évolutions d'outils nécessiteront de revoir le fonctionnement d'EXPRESSO pour faciliter in fine l'expression du prévisionniste et assurer la cohérence des prévisions successives au cours d'un événement de crue (Berthet et al., 2019).

5 REFERENCES

- Bellier J., Bontron G., Zin I. 2017. Using meteorological analogues for reordering postprocessed precipitation ensembles in hydrological forecasting. *Water Resources Research*, 53, 10,085– 10,107. <https://doi.org/10.1002/2017WR021245>
- Bellier J., Zin I., Bontron G. 2018. Generating coherent ensemble forecasts after hydrological postprocessing: Adaptations of ECC-based methods. *Water Resources Research*, 54, 5741– 5762. <https://doi.org/10.1029/2018WR022601>
- Bellier J., Bontron G., Zin I. 2021. Selecting components in a probabilistic hydrological forecasting chain: the benefits of an integrated evaluation, *LHB*, 107:1, <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1936825>

- 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. <https://theses.hal.science/tel-02594604v1>
- Berthet L., Gaume E., Piotte O., les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI et du chantier d'intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision. 2016. Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information. La Houille Blanche, 4: 18-24. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>
- Berthet L., Valéry A., Garçon R., Marty R., Moulin L., Puygrenier D., Piotte O., Le Lay M., Janet B., Duquesne F. 2019. Cohérence des prévisions et place de l'expertise : les nouveaux défis pour la prévision des crues?, La Houille Blanche, 105:1, 5-12, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019001>
- Escudier A., Hans P.-A., Astier C., Souldadié J.-L. 2016. From high waters forecasts to flooded areas forecasts, E3S Web Conf., 7 (2016) 18008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160718008>
- Escudier A., Hans P.-A., Astier C., Souldadié J.-L. 2016. Prévision des inondations : gestion de crise et partage de l'information des zones inondées. La Houille Blanche, 5 (2016) 5-10, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016053>
- Jolliffe I. T., Stephenson D. B., 2011. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. San Diego, CA, USA : Wiley, pp. 296.
- Marty R., Faucard Y., Hans P.-A., Reinbold D., Berthet L. 2019. Se préparer pour une meilleure anticipation des crues, premier bilan des actions entreprises par le service de prévision des crues Loire-Cher-Indre. La Houille Blanche, 1: 26-32. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019004>
- Marty R., Gautheron A., Edouard S., Horton P., Obled C. 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.
- Nicolas M., Faucard Y., Marty R., Marlette S. 2023. Prévisions quantitatives : analyse et apport de l'expertise. Application aux stations de la Loire, Colloque SHF Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives, Toulouse.
- Raftery A.E., Gneiting T., Balabdaoui F., Polakowski M. 2005. Using Bayesian Model Averaging to calibrate forecast ensembles. Mon. Weather Rev. 133, 1155–1174
- Valéry, A., 2010. Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp. <https://theses.hal.science/tel-02594605v1>
- Viatgé J., Berthet L., Marty R., Bourgin F., Piotte O., Ramos M.-H., Perrin C. 2019. Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France. La Houille Blanche, 2: 63-71. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019016>
- Zappa M., Fundel F., Jaun, S. 2013. A ‘Peak-Box’ approach for supporting interpretation and verification of operational ensemble peak-flow forecasts. Hydrol. Process., 27: 117-131. <https://doi.org/10.1002/hyp.9521>