

**PREVISIONS QUANTITATIVES: ANALYSE ET APPORT DE  
L’EXPERTISE. APPLICATION AUX STATIONS DE LA LOIRE**  
*Quantitative forecasts: analysis and expertise contribution. Application to the  
Loire stations*

**Auteurs :** NICOLAS Matthieu<sup>1\*</sup>, MARTY Renaud<sup>2</sup>, FAUCARD Yoann<sup>2</sup>

\* *auteur correspondant*

<sup>1</sup>DREAL PAYS DE LA LOIRE, Nantes, France, matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

<sup>2</sup>DREAL CENTRE VAL DE LOIRE, Orléans, France, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

**Résumé :** Les prévisions quantitatives réalisées par les services de prévision des crues (SPC) sont un outil de communication majeur pour le réseau Vigicrues. Sur la Loire, les prévisions sont quotidiennes et elles sont archivées depuis 2017 constituant une base de données suffisante pour analyser la fiabilité et la précision de ces données selon trois angles. L’étude temporelle confirme l’amélioration continue de la fiabilité de ces prévisions. La comparaison aux prévisions brutes issues de la modélisation souligne quant à elle l’apport positif de l’expertise des prévisionnistes. L’analyse des prévisions réalisées pendant les crues ne montre pas de dégradation des résultats confirmant ainsi la pertinence des outils développés et des formations élaborées pour fournir la meilleure information possible. Dans la partie estuarienne, des difficultés sont rencontrées pour réaliser des prévisions mettant en évidence la limite des outils et la nécessité d’en développer des nouveaux.

**Mots-clefs :** prévision quantitative, expertise, fiabilité, précision

**Abstract :** The quantitative forecasts produced by the flood forecasting services are a major communication tool for the Vigicrues network. On the Loire, the forecasts are daily and they have been stored since 2017, constituting a sufficient database to analyze the reliability and accuracy of this data from three angles. The temporal study confirms the continuous improvement in the reliability of these forecasts. The comparison with the raw forecasts resulting from the modeling underlines the positive contribution of the expertise of the forecasters. The analysis of the forecasts made during the floods does not show any deterioration in the results, thus confirming the relevance of the tools developed and the training established to provide the best possible information. In the estuary part, difficulties are encountered in making forecasts, highlighting the limits of the tools and the need to develop new ones.

**Keywords:** quantitative forecast, expertise, reliability, accuracy

## 1. INTRODUCTION

Le projet “Prévision 2015”, lancé par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), avait pour objectif la publication sur le site public Vigicrues de prévisions quantitatives associées à des incertitudes sur les stations de vigilance du réseau lors des événements de crue. Sur la Loire, une des particularités est que la production est quotidienne, quelque soient les conditions hydrologiques, suivant ainsi les prescriptions de Berthet *et al.* (2016) : « pour favoriser l'apprentissage et la construction d'expertise au sein des services de prévision, il est souhaitable que des prévisions soient produites tous les jours, même hors périodes de crues. ». Cette publication est bien antérieure à 2015 mais elle était réalisée sur des sites internet locaux et sans incertitudes associées. La diffusion de ces données depuis 2017 sur le site Vigicrues rend essentiel la vérification de la qualité des prévisions pour s'assurer de la pertinence de l'information délivrée et ainsi permettre aux gestionnaires de crise et au grand public de les utiliser pour leurs propres usages. L'objectif de cette étude est d'analyser l'ensemble de es prévisions sur la Loire et de cibler les éventuels leviers d'amélioration. La large gamme de débits étudiés (de 100 à 4200 m<sup>3</sup>/s à Montjean-sur-Loire) permet d'obtenir un échantillon plus important que les seules prévisions durant les événements de crue ou de surcote. L'analyse se fera en trois temps : une analyse par année et par station sur l'ensemble des prévisions, une comparaison aux prévisions brutes (avant expertise) et une analyse focalisée sur les événements de crue.

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1 Secteur d'étude

Les stations étudiées (Figure 2) sont toutes situées sur la Loire. Elles sont gérées par deux services de prévisions des crues (SPC) différents. Le SPC Loire-Allier-Cher-Indre (LACI) réalise des prévisions sur les stations de Cours-les-Barres à Langeais, le SPC Maine-Loire Aval (MLA) sur les stations de Saumur à Nantes. En basses et moyennes eaux (débit inférieur à 1000 m<sup>3</sup>/s à Montjean) et selon le coefficient de marée, la marée peut se faire ressentir jusqu'à Ancenis (zone temporairement marnée). Sur cette station, les prévisions sont réalisées à basse mer quand le marnage se fait ressentir et sur l'ensemble du limnigramme le reste du temps. A Nantes, le marnage est présent toute l'année et peut atteindre 5 m pour les forts coefficients (zone marnée). Les prévisions ne concernent que les pics de pleine mer.

### 2.2 Modélisation hydrologique

La Figure 1 présente l'étendue des différents modèles utilisés par les deux SPC pour réaliser des prévisions quantitatives quotidiennes. Le système de prévision du SPC LACI en Loire moyenne, entre le bec d'Allier et le bec de Vienne, est couvert à la fois par des sous-modèles hydrauliques (1D) ou à propagation simple (déformation et translation d'hydrogrammes) en injectant les principaux affluents que son l'Allier et le Cher. Sur l'axe Loire l'enchaînement des prévisions débute au barrage de Villerestdans le cas des prévisions émises quotidiennement, i.e. hors crue, la modélisation n'intègre pas la Loire en amont de cet ouvrage, du fait de débits plus anthropiques que naturels en sortie de cet ouvrage. L'expertise est ainsi basée sur ces modèles et intègre différentes sources d'incertitudes à l'aide des outils OTAMIN (Viatgé et al., 2019) et PROPAG (Faucard et al., 2023).

Au sein du SPC MLA, les prévisions sont basées sur deux modèles principaux de la plateforme Mascaret (modélisation en 1D). Le premier couvre la Loire depuis Langeais jusqu'à Montjean en remontant sur les affluents majeurs que sont la Vienne et les affluents de la Maine. Le second

commence à Montjean et s'étend jusqu'à Saint-Nazaire en remontant sur la Sèvre Nantaise. Il englobe ainsi tout le linéaire influencé par la marée. Les prévisions réalisées par ces modèles sont associées à des incertitudes par défaut dépendantes de l'échéance. Elles peuvent être retravaillées par le prévisionniste en fonction du contexte : incertitudes sur les pluies, fort gradient,...

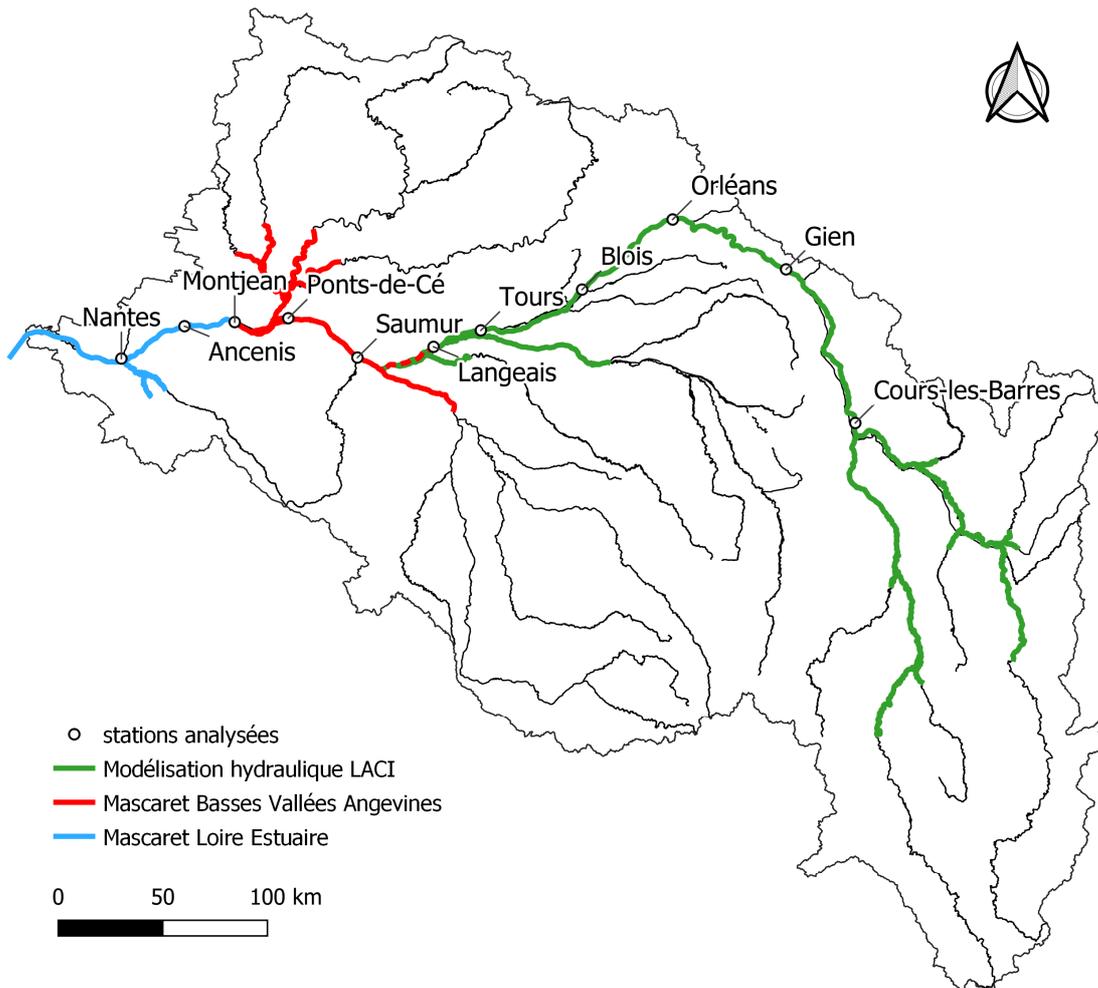


Figure 1: Carte du bassin versant de la Loire avec les stations analysées dans l'étude et l'étendue des différents modèles

## 2.3 Méthodologie et critères d'évaluation des prévisions quantitatives

### Les prévisions quantitatives

Les prévisions quantitatives prennent la forme de tendances basses, centrales et hautes correspondant, a priori, aux probabilités au non-dépassement de 10 %, 50 % et 90 % (Berthet *et al.*, 2016). L'échéance

maximale des prévisions diffuses, appelée ici délai de diffusion, varie en fonction des stations (Tableau 1). Le délai (d) augmente de l’amont vers l’aval, sauf pour Nantes pour laquelle les prévisions de surcote jouent un rôle important sur les niveaux prévus et peuvent présenter une forte incertitude à longue échéance. Par la suite, l’analyse sera faite pour deux échéances : la courte échéance concerne les points de prévision contenus entre l’instant de prévision et la moitié du délai ( $(t-d/2)$ ). La longue échéance concerne les points entre la moitié du délai et le délai de diffusion ( $(t-d)$ ). Pour les stations jusqu’à Ancenis, l’erreur entre l’observation et la prévision est calculée au même instant t. Pour Nantes (pic de pleine mer uniquement), une tolérance temporelle de  $\pm 1$  h est prise en compte pour rechercher le maximum observé dans cette fenêtre.

### Fiabilité

Ce terme correspond à la mesure de l’adéquation entre la prévision probabiliste émise (tendances) et les observations. Cela consiste à comparer le positionnement de chaque observation parmi les tendances et à vérifier la concordance entre la prévision probabiliste affichée (10, 50 et 90 %) et la fréquence au non-dépassement des tendances : les précipitations affichées avec une probabilité au non-dépassement de x% sont-elles réellement observées avec cette probabilité ?

Il est a priori désirable d’émettre des prévisions probabilistes qui soient les plus fines possibles, car cela signifie que l’incertitude sur la variable à prévoir est faible. Par exemple, dans un contexte de prise de décision où le dépassement d’un seuil implique l’émission d’une alerte, un utilisateur préférera des prévisions fines, car synonymes de probabilités de dépassement proches de 0 ou de 1. Cependant, des prévisions fines mais peu fiables ont peu d’intérêt, car l’utilisateur sait alors que la probabilité de dépassement émise ne correspond pas à la probabilité réelle de dépassement. À l’inverse, des prévisions parfaitement fiables mais peu fines sont d’un intérêt très relatif pour cet utilisateur, car elles ne lui apportent aucune information supplémentaire par rapport à ce qu’il sait déjà. Il est donc essentiel que fiabilité et finesse doivent aller de pair pour que la qualité des prévisions soit élevée : le but de la prévision probabiliste est de s’assurer de la fiabilité avant de chercher à maximiser la finesse.

La fiabilité est mesurée au travers du diagramme de rang (parfois appelé diagramme de Talagrand), à partir des 3 séries de valeurs probabilistes : les tendances basse (probabilité au non-dépassement : 10 %), centrale (50 %) et haute (90 %). Ces trois tendances définissent ainsi 4 catégories dans lesquelles seront placées les observations :

- (1) observation < tendance basse : dans 10 % des cas ;
- (2) tendance basse  $\leq$  observation < tendance centrale : dans 40 % des cas ;
- (3) tendance centrale  $\leq$  observation < tendance haute : dans 40 % des cas ;
- (4) tendance haute  $\leq$  observation : dans 10 % des cas ;

Afin de comparer plus facilement les stations entre elles, l’intervalle de confiance à 80 % (IC80) rassemblant les classes 2 et 3 sera utilisé dans un premier temps afin de vérifier si 80 % des observations se trouvent effectivement dans l’intervalle d’incertitude des prévisions.

### Précision

La précision est mesurée par la distance entre la valeur prévue et la valeur observée. Elle peut être déterminée par plusieurs critères de distance comme l’écart quadratique moyen (EQM) qui sera utilisé par la suite :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

où  $y_i$  représente la valeur observée,  $\hat{y}_i$  la valeur prévue au même instant et  $n$  le nombre de données. Ici, la valeur prévue est extraite de la tendance centrale (médiane).

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Résultats globaux et par année

Le calcul de la fiabilité des prévisions expertisées donne des résultats différents en fonction des deux territoires. Le SPC LACI présente globalement des intervalles de confiance à 80 % inférieurs à l'objectif que ce soit à faible échéance ou à longue échéance (colonne « prévisions expertisées » du Tableau 1). Cependant, l'évolution de l'IC80 est notable avec le temps. Il était en moyenne sur l'ensemble des stations du SPC LACI de 52 % en 2017 pour atteindre 82 % en 2022 à courte échéance et de 44 % en 2017 pour atteindre 80 % en 2022 à longue échéance. Les résultats pour 2017 sont à modérer avec le nombre de données plus faibles pour cette première année que pour les années suivantes. L'amélioration des outils, avec notamment l'intégration de la quantification des incertitudes associées aux prévisions en 2018 sur les secteurs de propagation et la formation continue des prévisionnistes ont en partie permis d'atteindre les objectifs en quelques années (voir notamment Marty et al., 2019).

Dans le secteur du SPC MLA, l'IC80 évolue moins au cours du temps. A courte échéance, il est trop élevé, dépassant toujours les 80 % (sauf en 2017 à Ancenis). A longue échéance, l'IC80 est proche de l'objectif des 80 % à l'exception de Nantes. Les prévisions à Nantes sont en effet au-delà des 90 % à longue échéance. Globalement, l'observation est trop souvent dans l'intervalle d'incertitude à courte échéance, ce qui signifie que l'intervalle de la prévision n'est pas assez fin sur les débuts des prévisions. Cela est également valable sur Nantes à longue échéance. L'expertise du prévisionniste est dans ce cas prépondérante. Les prévisions sont réalisées à haute mer uniquement mais avec l'affichage de l'ensemble du marégramme (pouvant atteindre 5 m de marnage), écrasant visuellement l'intervalle d'incertitude. Le prévisionniste ne se rend ainsi pas compte de la largeur importante de l'intervalle et a tendance à l'exagérer. L'outil d'expertise montre ses limites pour répondre aux besoins des prévisionnistes dans les zones marnées.

Tableau 1: Délai de diffusion et intervalle de confiance à 80 % global pour chaque station (courte échéance : CE, longue échéance : LE)

Libellé	Délai	Prévisions expertisées 2017-2023		Prévisions brutes 2017-2023		Sélection d'événement	
		CE	LE	CE	LE	CE	LE
Cours-les-Barres	20 h	69%	64%	56%	52%	79%	69%
Gien	28 h	76%	64%	66%	59%	85%	65%
Orléans	28 h	76%	65%	62%	56%	75%	56%
Blois	28 h	75%	70%	64%	64%	84%	79%
Tours	28 h	73%	66%	63%	60%	78%	64%
Langeais	30 h	79%	69%	70%	63%	86%	74%
Saumur	48 h	94%	83%	95%	86%	91%	84%
Ponts-de-Cé	72 h	94%	86%	95%	83%	90%	77%
Montjean	72 h	93%	80%	92%	78%	96%	85%
Ancenis	72 h	85%	78%	-	-	88%	78%
Nantes	36 h	87%	92%	-	-	-	-

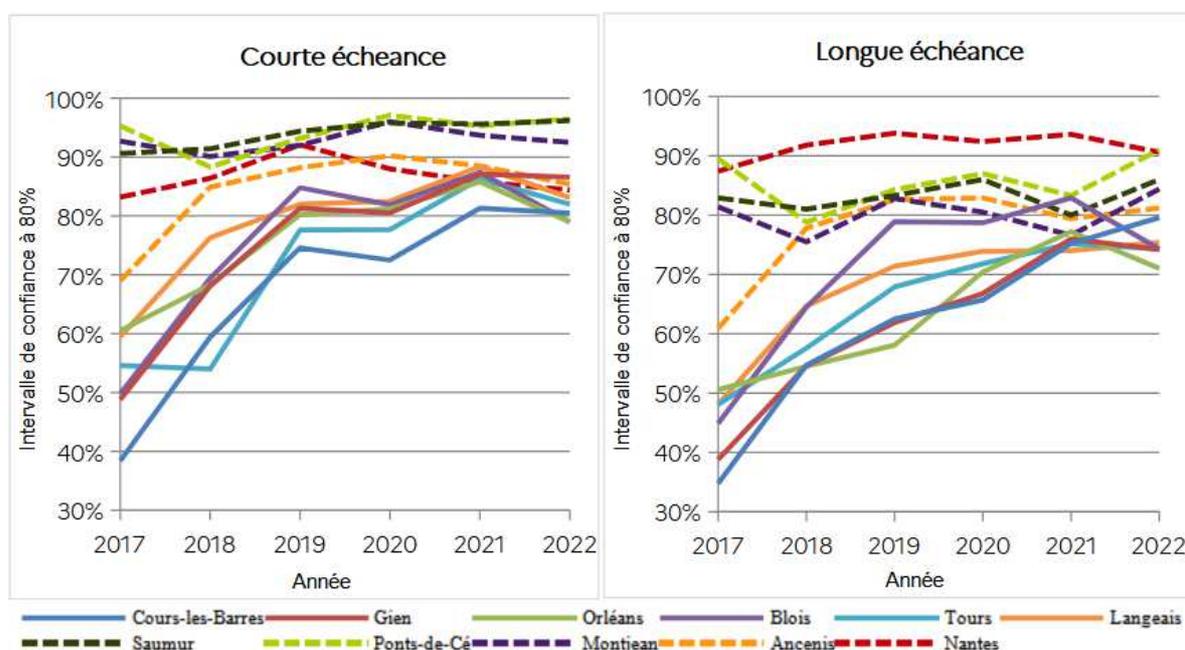
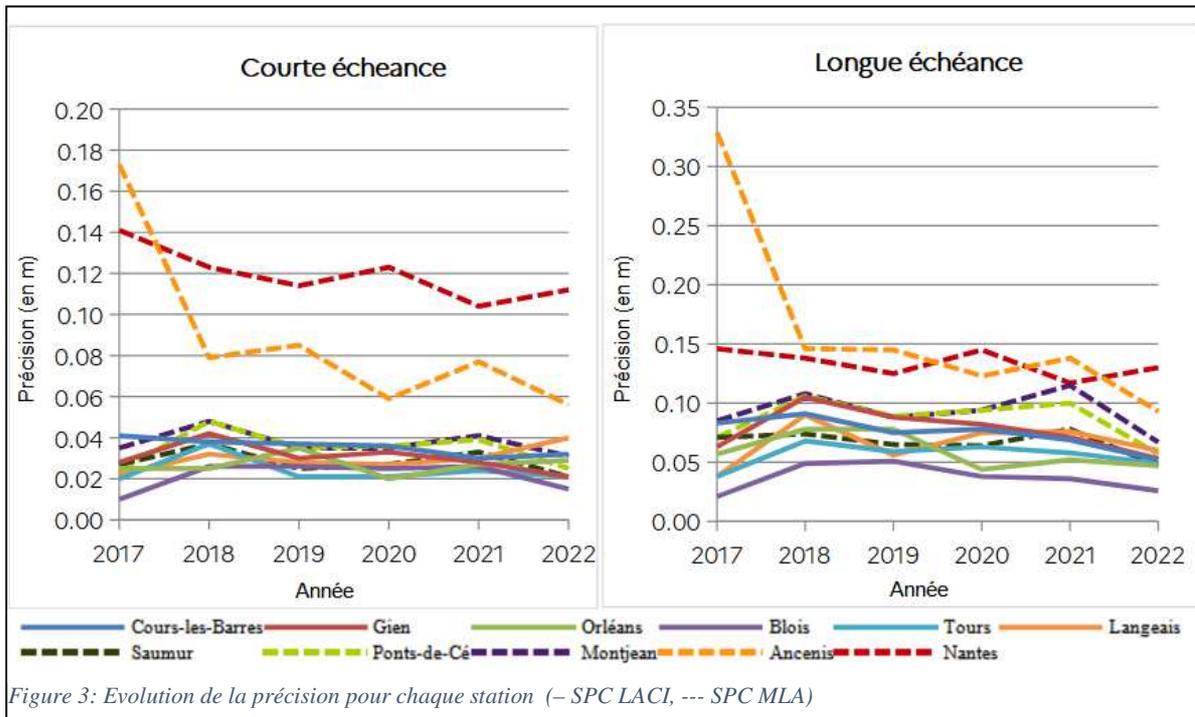


Figure 2: Evolution de l'intervalle de confiance à 80% (IC80) pour chaque station (– SPC LACI, --- SPC MLA)



Au niveau de la précision, la différence se fait essentiellement entre zone marnée et non marnée. Dans cette zone, l’erreur quadratique moyenne est faible à courte échéance (de 2 à 7 cm) et à longue échéance (de 4 à 11 cm). Les incertitudes dans ce secteur et pour ces échéances sont peu influencées par les pluies et essentiellement par de la propagation de débits amont pour lesquels l’incertitude est plus faible.

Pour les zones marnées, l’EQM est plus élevée. A Ancenis, une partie de l’explication est la méthode d’extraction des données. Un décalage temporel entre le point de basse mer prévu et observé peut engendrer des écarts d’autant plus importants que le marnage est fort : l’observation extraite n’est pas celle de basse mer mais celle à l’instant de prévision. La méthode d’analyse est ainsi biaisée pour les zones temporairement marnées lorsque l’influence maritime est perceptible. Pour Nantes qui est en zone toujours marnée, la tolérance temporelle (+-1h) permet d’éviter cet écueil de la méthode. La précision reste cependant moins bonne que les autres stations non marnées.

Les diagrammes de rang montrent une bonne répartition des observations vis-à-vis des prévisions sauf pour Nantes (

**NANTES (M800001010, Loire (La)) – Indicateur Fiabilité**

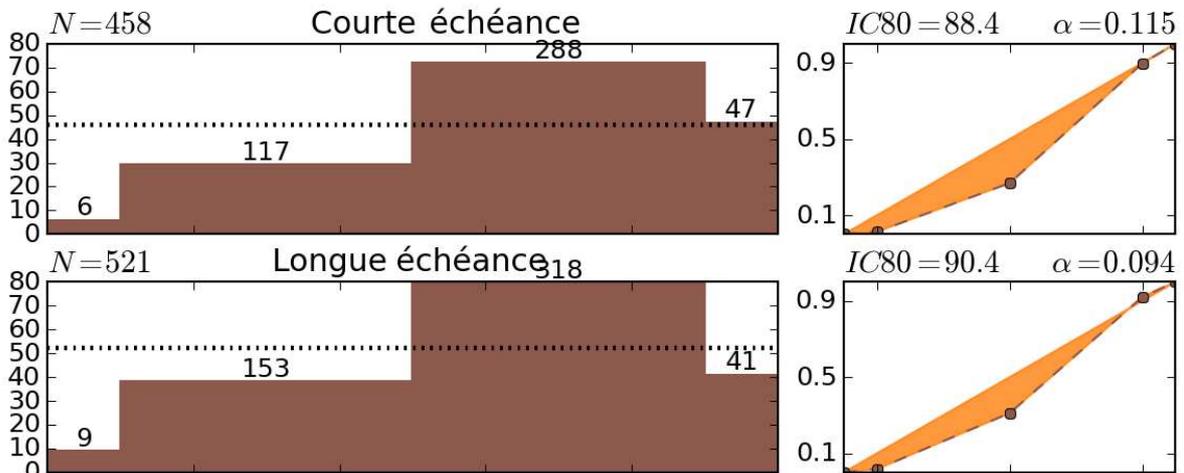


Figure 4). Les observations sont trop fréquemment dans l'intervalle d'incertitude comme l'indique la fiabilité mais elles sont aussi majoritairement au-dessus de la prévision centrale (environ 70 % au-dessus au lieu des 50 % visés). La comparaison avec les prévisions brutes au paragraphe suivant apportera des éclaircissements.

**NANTES (M800001010, Loire (La)) – Indicateur Fiabilité**

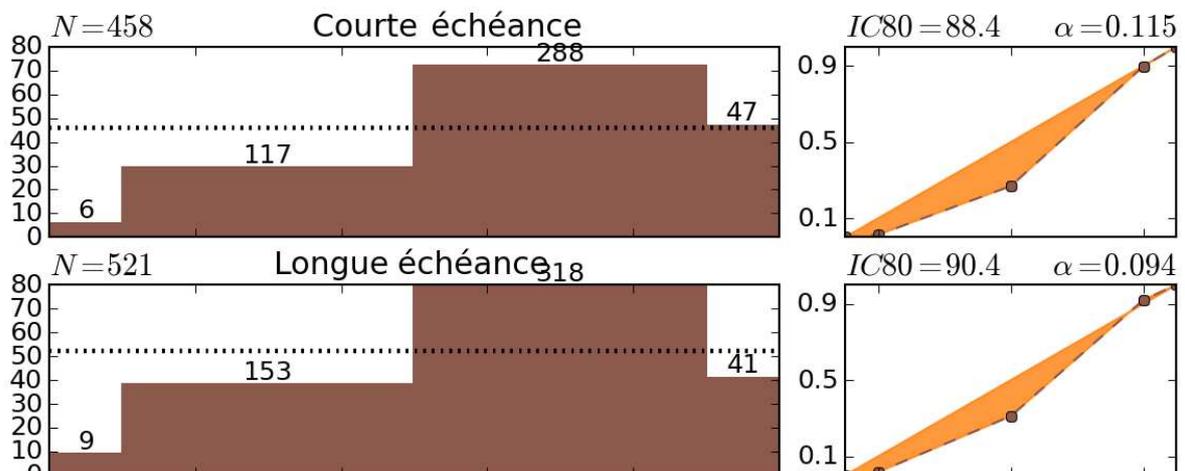


Figure 4: Diagramme de rang à Nantes pour l'ensemble des prévisions

### 3.2 Apport de l'expertise des prévisionnistes

Les prévisions brutes sont définies comme étant la sortie du modèle ayant servi de base à l'expertise. Un recalage à la dernière observation disponible au moment de l'expertise a été appliqué pour les

stations non marnées. L'incertitude associée est celle d'OTAMIN ou PROPAG (Faucard *et al.*, 2023) pour le SPC LACI ou celle par défaut pour le SPC MLA. Le recalage automatique étant trop complexe pour les stations marnées, elles ne sont pas intégrées aux calculs de fiabilité ci-dessous. Cette prévision brute peut sous-estimer l'incertitude prédictive totale puisque seule celle de la modélisation est prise en compte.

Le Tableau 1 et la Figure 5 présentent les résultats de fiabilité pour ces prévisions brutes recalées. En les comparant aux résultats de la Figure 2, ils mettent en évidence une amélioration de la fiabilité grâce à l'expertise. En particulier à longue échéance, l'IC80 des prévisions brutes est bien inférieur à 80 % pour les stations du SPC LACI et il est très variable dans le temps pour celles du SPC MLA. Le prévisionniste corrige l'intervalle d'incertitude et permet d'obtenir des meilleurs scores.

Une comparaison entre les écarts avec l'observation des prévisions centrales brutes sans recalage et les prévisions expertisées est présentée

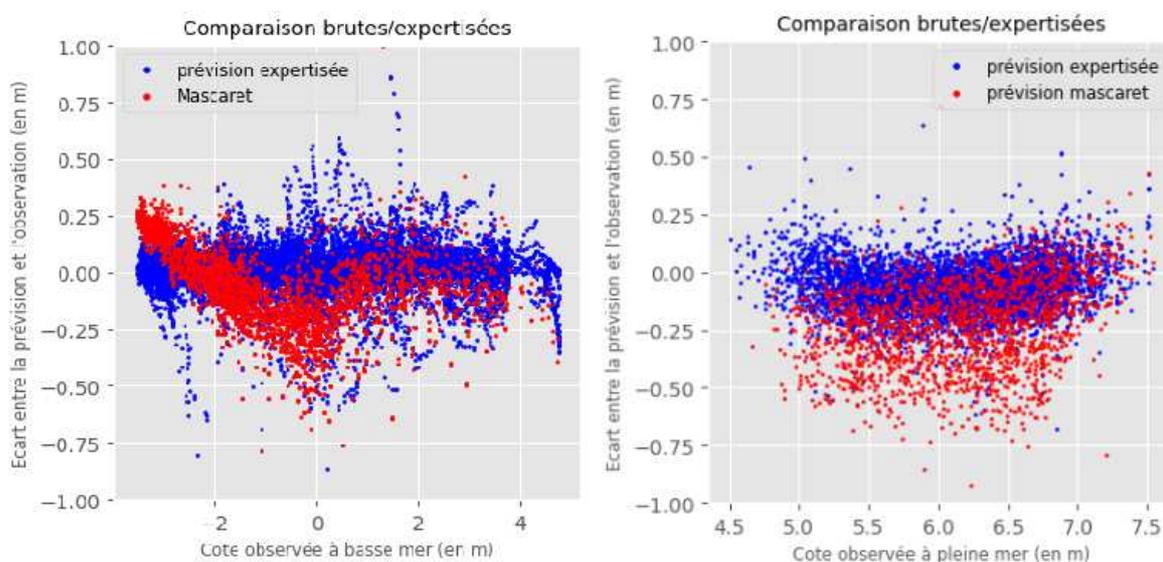


Figure 6. Au niveau d'Ancenis, le modèle présente une surestimation des hauteurs pour les niveaux les plus bas et une sous-estimation à la cote 0 m (au-delà le marnage est imperceptible). Les prévisionnistes corrigent ce biais essentiellement grâce à un recalage sur la dernière basse mer. Les sorties du modèle Mascaret à Nantes présente un biais négatif. Une des raisons s'explique par les données d'entrée à St-Nazaire. En période de surcote faible, le modèle de surcote est biaisé négativement par rapport aux observations au niveau de St-Nazaire. L'autre raison est le modèle Mascaret en lui-même qui est optimisé pour des hauteurs supérieures à 7 m et qui sous-estime les pleines mers en-deçà. Le prévisionniste opère un recalage pour tenter de corriger au mieux le biais du modèle par comparaison entre les pleines mers observées et modélisées avant l'instant de prévision. Cependant, il ne tient pas forcément compte du biais des données d'entrée à St-Nazaire qui ne sont pas visibles sur le même outil. Ce recalage n'est pas suffisant comme le montre les diagrammes de rang (

**NANTES (M800001010, Loire (La)) – Indicateur Fiabilité**

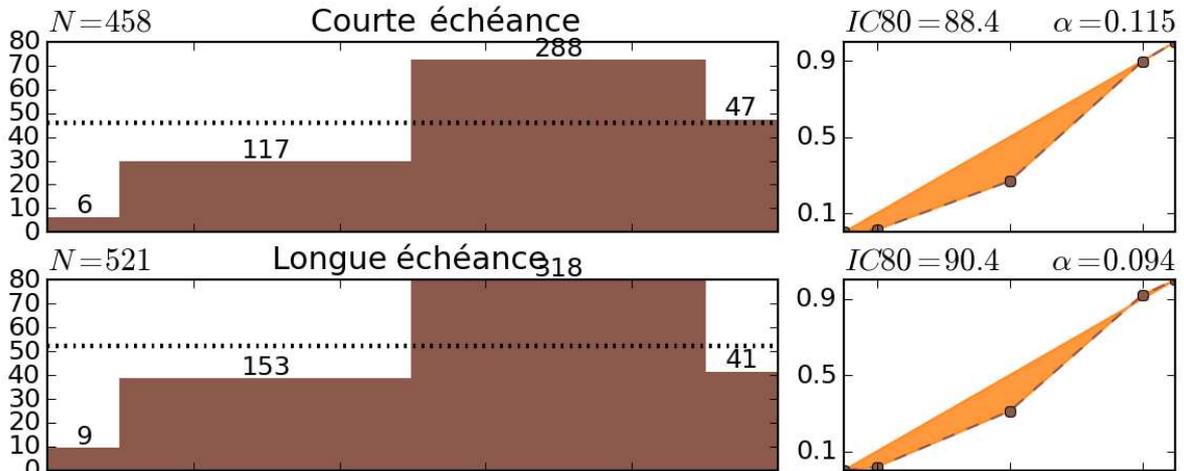


Figure 4). Lors des formations, ce point est abordé pour essayer de corriger au mieux le biais.

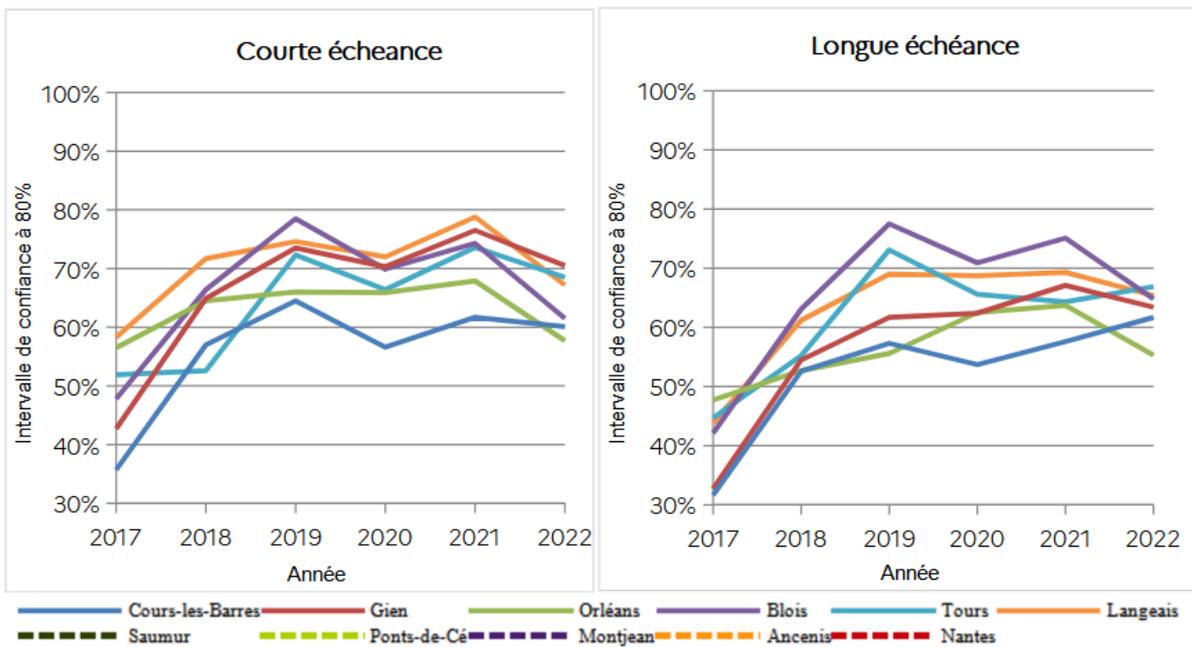


Figure 5: Evolution de l'intervalle de confiance à 80% (IC80) pour les prévisions brutes (- SPC LACI, --- SPC MLA)

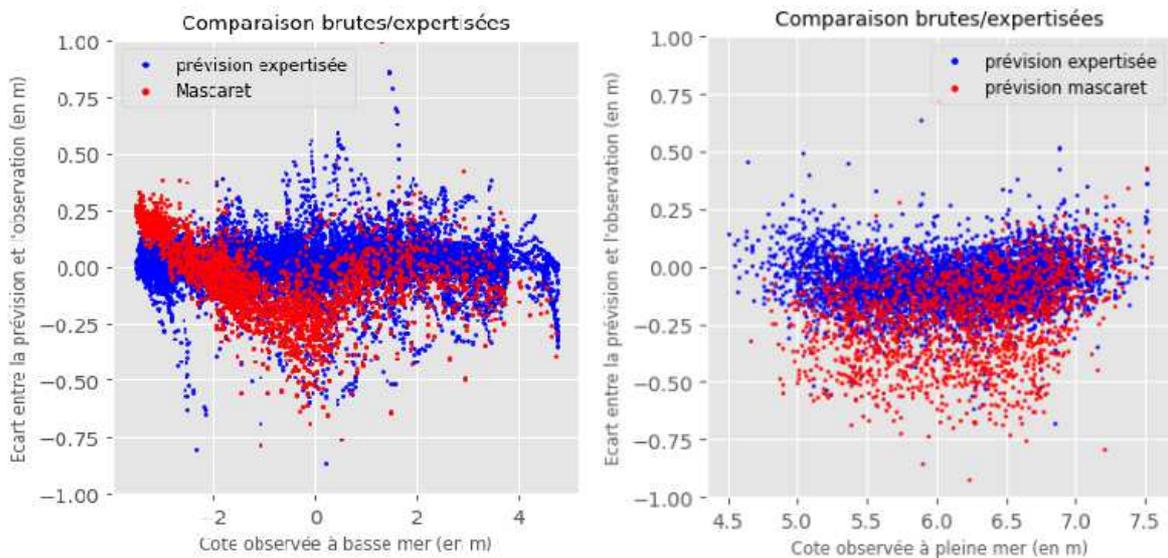


Figure 6: Comparaison entre les prévisions centrales brutes et expertisées (Ancenis à gauche, Nantes à droite)

### 3.3 Focus sur les événements de crue

Durant la période étudiée 2017-2023, le nombre de crues est faible et aucune crue de grande ampleur n'a été observée, réduisant drastiquement l'échantillon. Il a donc été décidé de retenir les événements pour lesquels le pic de crue a dépassé 800 m<sup>3</sup>/s au bec d'Allier (Cours-les-Barres) pour le SPC LACI et 2000 m<sup>3</sup>/s à la station de Montjean pour le SPC MLA. Pour chaque SPC, 9 événements ont ainsi été sélectionnés. Le calcul n'a pas été réalisé sur Nantes car la sélection des événements majeurs est également dépendante des conditions maritimes. Les résultats par événements (Tableau 1) donnent des résultats proches ou meilleurs que les résultats sur l'ensemble des prévisions pour toutes les stations sauf à Orléans à longue échéance. Ce mauvais résultat n'a pas à ce stade d'explication évidente. Il sera nécessaire de vérifier sur les futurs événements de crue si le problème persiste et en trouver la cause. A l'exception de ce cas isolé, les prévisions ne sont donc pas dégradées lors des crues qui restent la mission principale des prévisionnistes.

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'examen des prévisions quantitatives réalisées au sein des services de prévisions des crues sur la Loire mettent en évidence l'amélioration continue des outils et des prévisionnistes permettant d'atteindre les objectifs fixés de fiabilité et de précision des prévisions quel que soit les conditions hydrologiques. L'exercice quotidien du prévisionniste est un atout important dans la connaissance des stations et des biais de modélisation associés qui permet de maintenir les bons résultats lors des événements de crue, ce qui confirme les recommandations de Berthet *et al.* (2016). Si la situation globale est bonne, il ressort que la formation des prévisionnistes est à améliorer sur Nantes au vu des résultats sur la fiabilité (intervalle de confiance trop large) et présence d'un biais. Le développement d'un outil adapté à l'expertise en zone estuarienne est souhaitable pour maintenir les mêmes niveaux de fiabilité que sur la zone non marnée. Les prévisions sur la Loire en aval du bec d'Allier reste un cas

particulier pour lequel l’influence des pluies et donc l’incertitude associée est faible. Cette analyse devra être réalisée sur d’autres stations de vigilance du réseau Vigicrues. La quantité de prévisions est souvent un facteur limitant (prévision uniquement en crue). Elle sera à réactualiser sur la Loire lors de crue de plus grande ampleur.

## 5. REFERENCES

- Berthet L., Gaume É., Piotte O., les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI & du chantier d’intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision, 2016. *Estimation and communication of uncertainties related to hydrological forecasts for a better information sharing*. La Houille Blanche, 102:4, 18-24, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>
- Brochero D., Ancil F., Gagne C., 2011. *Simplifying a hydrological ensemble prediction system with a backward greedy selection of members - Part 1 : Optimization criteria*. Hydrology and Earth System Sciences 15 (11), 3307—3325.
- Candille G., Talagrand O., 2005. *Evaluation of probabilistic prediction systems for a scalar variable*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 2131–2150.
- Faucard Y., Marty R., Hans P.-A., 2023. *Production et mise à disposition d’informations sur les crues : focus sur une décennie de développements au service de prévision des crues Loire-Allier-Cher-Indre*. La Houille Blanche.
- Laio F., Tamea S., 2007. *Verification tools for probabilistic forecasts of continuous hydrological variables*. Hydrology and Earth System Sciences, 11: 1267–1277.
- 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>
- 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>