

EVOLUTION DE LA STRATEGIE DE MODELISATION AU SEIN DU SPC VCB ET CONSEQUENCES SUR LA PRODUCTION DE LA VIGILANCE

*Evolution of the modelling strategy within the SPC VCB and consequences on
the flood alert production*

Auteurs : TREILLES Robin^{1*}, BERNARD Alexis², RIVAT Antonin¹, TIBERI-WADIER
Anne-Laure³, BRUNET Frédéric², LE PAPE Etienne⁴, LE FALHER Laurent¹, BELIN
Thomas¹

* *auteur correspondant*

^{1*} Service Prévision des Crues Vilaine et Côtiers Bretons, DREAL Bretagne 10 rue Maurice
Fabre 35065 Rennes Cedex, France, robin.treilles@developpement-durable.gouv.fr

² Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et
l'Aménagement Ouest, 5 rue Jules Vallès – 22015, France, alexis.bernard@cerema.fr

³ Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et
l'Aménagement, Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer 29280 Plouzané, France,
anne-laure.tiberi-wadier@cerema.fr

⁴ Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, 42 avenue
Gaspard-Coriolis 31057 Toulouse Cedex 1, France, etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr

Résumé :

Le Service Prévision des Crues Vilaine et Côtiers Bretons (SPC VCB) est responsable de la vigilance crues sur les cours d'eau à enjeux de la région Bretagne. Depuis sa création en 2005, le SPC VCB a dû s'adapter à la fois aux attentes des gestionnaires de crises et à l'évolution des outils de modélisation. Comment a évolué la stratégie de modélisation du SPC VCB au fil du temps et quelles conséquences ont eu ces évolutions sur la production de la vigilance ? Pour ce faire, l'ensemble des modèles utilisés actuellement ou précédemment par le SPC VCB a été répertorié de 2014 à aujourd'hui. Ces modèles ont été classés en trois catégories : statistiques, hydrologiques et hydrauliques. Enfin, la conformité des points de prévision de chaque année hydrologique a été analysée afin d'observer l'impact du développement des modèles sur la qualité de la prévision. Les données révèlent une diversification du panel de modèles au fil du temps, bien que les modèles statistiques restent majoritaires. En 2014, seuls les modèles statistiques étaient représentés. Aujourd'hui 59,7 % des sorties de modèles sont issues d'un modèle statistique, 34 % sont issues d'un modèle hydrologique et 6,3 % sont issues d'un modèle hydraulique. La moyenne de conformité annuelle a constamment augmenté au fil des années, passant de 52,6 % pour la période 2007 – 2011 à 74,5 % pour la période 2019 – 2023. Ces stratégies de modélisation ont participé à l'amélioration de la vigilance crues.

Mots-clefs : modélisation hydrologique, modélisation hydraulique, stratégie de déploiement, vigilance crues

Abstract :

The Vilaine and Breton coastal streams flood forecasting service (SPC VCB) is responsible of the flood alert production on the Brittany territory. Since its creation in 2005, the SPC VCB had to adapt both on the crisis manager expectations and on the modelling tools evolutions. How did the modelling strategy within the SPC VCB evolve over time and which consequences these evolutions had on the flood alert production? To this end, whole range of models used by the SPC VCB were classified from 2014 to 2023 in three categories: statistic, hydrologic and hydraulic. Lastly, conformity of the prevision points were compared for each hydrological year to evaluate the impact of the modelling development on the forecasting performance. Those data reveal a diversification of the models category over time, even though statistic models are still predominant. In 2014, only statistic models were used. Nowadays, 59.7% of model output come from statistic models, 34% come from hydrologic models and 6.3% come from hydraulic models. The mean annual conformity constantly increased, from 52.6% in 2007 – 2011 to 74.5% in 2019 – 2023. The modelling strategies took part in the flood alert improvement.

Keywords: hydrologic modelling, hydraulic modelling, implementation strategy, flood alert

1. Introduction

Le Service Prévision des Crues Vilaine et Côtiers Bretons (SPC VCB) est chargé, depuis 2005, de la production d’une vigilance crues sur les principaux cours d’eau de la région Bretagne. Il est administrativement rattaché à la DREAL Bretagne et constitue l’un des 17 SPC du réseau Vigicrues. Conformément au Règlement de surveillance et de transmission de l’Information sur les Crues 2019 (RIC, 2019), la vigilance crues « donne une indication la plus fiable possible à l’échelle du tronçon sur les risques engendrés par une crue ou une montée rapide des eaux sur les cours d’eau du périmètre surveillé dans les 24 heures à venir ». Le choix de la couleur de vigilance (verte, jaune, orange ou rouge en fonction de l’intensité du phénomène et des enjeux exposés) ainsi que la diffusion des prévisions des hauteurs et débits aux stations de vigilance et de prévision, sont réalisés par une équipe de prévisionnistes dont le dimensionnement et le fonctionnement dépendent de l’importance de l’évènement. Cette expertise locale est transmise au Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), chargé de l’accepter ou de la modifier, puis aux différents gestionnaires de crise concernés, ainsi qu’au grand public via le site www.vigicrues.gouv.fr. Les évolutions techniques des quinze dernières années ont permis au SPC VCB de se doter d’un panel de modèles. Pour un évènement donné, le choix de la couleur de vigilance crues est issu d’une analyse multicritère faisant intervenir : (i) les données transmises par Météo France ; (ii) les caractéristiques des bassins versants surveillés ; (iii) la quantité, le type et la performance des modèles disponibles sur le territoire. À l’issue de ce processus, les prévisions expertisées et leur incertitude associée sont comparées aux niveaux de référence (fixés par ailleurs en fonction des enjeux et périodes de retour connues). La présence ou l’absence et le nombre de modèles de prévision peut grandement impacter la production de la vigilance crues et l’anticipation des évènements. Du fait de l’évolution des attentes en matière de sécurité civile, de l’amélioration des outils informatiques et des modèles de prévision, les pratiques liées à la production de la vigilance crues ont évolué. Comment le SPC VCB a adapté sa stratégie de modélisation afin d’optimiser la prévision des crues ? Cette étude s’intéresse à l’apport des différents types de modèles sur la production de la vigilance crues dans un service opérationnel.

2. Contexte spécifique au SPC VCB

Dans les années 90 sur la région Bretagne, le SPC VCB a été précédé par les Services d’Annonce des Crues (les SAC 29 et 35). Les SAC fonctionnaient principalement en annonçant les crues sur la base de hauteurs observées. En pratique, les stations de mesure étaient souvent au droit des enjeux, et la hauteur d’annonce de crue correspondait au niveau d’exposition des enjeux avec une marge suffisante pour la mise en œuvre des mesures de sauvegarde locales. Avec l’évolution et le gain de performance des outils informatiques, un changement de stratégie s’est mis en place à partir de 2004 avec la création du réseau SCHAPI-SPCs. L’annonce de crues (hauteurs observées) a laissé place à la prévision des crues. Le SPC VCB est créé le 1er juin 2005. Les premiers outils développés consistaient en des abaques et tableurs permettant la corrélation entre différents paramètres (hauteur station A/hauteur station B par exemple). Ces abaques étaient issues de modèles de régressions simples ou multiples prenant en compte les conditions initiales du cours d’eau, les cumuls de pluies du bassin versant et parfois la saisonnalité. L’approche était donc plutôt statistique ou historique, sans représentation des phénomènes physiques à l’œuvre. À cette période, les modèles de prévision répondaient principalement à deux enjeux :

1. Proposer une couleur de vigilance ainsi qu’une hauteur maximale probable sur les bassins surveillés, avec une échéance maximale de prévision de 24h (échéance de la vigilance crues, mais pas toujours cohérente avec le temps de réponse du bassin concerné).
2. Disposer d’outils rapides, simples d’utilisation et efficaces pour la prévision des crues.

En première approche, la représentation statistique s’est révélée particulièrement adaptée au territoire breton. Elle a permis une approche méthodologique unique malgré la diversité des facteurs d’influence majeurs sur ce territoire densément anthropisé (présence de nombreux ouvrages), constitué de fleuves côtiers à réponse rapide et influencés par la marée. Cependant, les abaques et modèles statistiques ne répondent pas à d’autres critères importants qui sont : (i) la représentation physique du phénomène, permettant de modéliser un événement au-delà de l’historique connu ; (ii) l’étude de la dynamique de la crue ; (iii) la cartographie des zones inondables. Les modèles statistiques ne fournissaient qu’un maximum de hauteur probable, avec une incertitude fixe.

Les importantes inondations qu’a connu la région Bretagne de 2013 à 2014 (plus de deux mois en vigilance orange à rouge sur l’hiver 2013-2014) ainsi que l’évolution de l’ambition de service du réseau Vigicrues (volonté de développement des prévisions graphiques sur Vigicrues, cartographie des inondations...), ont marqué un tournant quant à la stratégie de modélisation. Le retour d’expérience des épisodes de crues 2013-2014 a également souligné l’importance de prendre davantage en considération les incertitudes des sorties de modèles météorologiques. De plus, à partir de 2019, le SPC VCB a commencé à intégrer trois nouveaux tronçons de vigilance, correspondant à neuf cours d’eau dans le département des côtes d’Armor. À la suite des événements de 2014, le recalage, le regroupement des abaques et la simplification de leur utilisation via leur interfaçage sont effectués par la création de l’outil « Ahlis » (Application Hydrométéorologique Libre du SPC VCB). L’année 2014 sera considérée dans cette étude comme le point de départ de développement d’un panel de nouveaux modèles pour le SPC VCB.

3. Méthodologie

En premier lieu, l’ensemble des modèles utilisés par le SPC VCB de 2014 à 2023 est répertorié. Ces modèles sont classés en trois catégories distinctes :

- La catégorie des modèles statistiques, définis comme l’ensemble des modèles utilisant des corrélations empiriques de hauteurs, de débits, de précipitations, d’état initial des ouvrages pour différentes stations de mesures hydrométriques. Ce type de modèle prévoit uniquement le pic maximal potentiel de la crue. Les processus physiques n’étant pas représentés, ces méthodes peuvent être utiles pour l’ensemble des stations (en amont ou en aval).
- La catégorie des modèles hydrologiques, définis comme l’ensemble des modèles reliant la pluie et le débit pour un bassin versant donné et qui rend compte de la dynamique de la crue. Le domaine de pertinence de ces modèles correspond aux stations situées dans les zones amonts des bassins versants.
- La catégorie des modèles hydrauliques, qui correspondent aux modèles utilisant la résolution des équations de Barré de Saint-Venant à l’aide d’une représentation fine de l’écoulement à partir d’un modèle numérique de terrain et/ou de données topo-bathymétriques. Cette fois-ci le domaine de pertinence est plutôt lié aux stations avals.

Les modèles statistiques du SPC VCB sont des modèles internes construits à partir d’abaques. On peut citer le modèle « Ahlis », présenté précédemment, ainsi que le modèle « Phylou », correspondant à un modèle hybride entre modèle statistique et hydrologique et qui a été codé principalement à partir de corrélations empiriques. Les modèles hydrologiques les plus communément utilisés par le réseau Vigicrues sont les modèles GR (Génie Rural), développés depuis les années 1980 par INRAE, et plus particulièrement le modèle GRP dont le champ d’application est spécifiquement tourné autour de la prévision des crues (Yang, 1993 ; Perrin, 2000 ; Perrin et al., 2003 ; Tangara 2005). En plus de GRP, la plateforme Plathynes qui regroupe plusieurs modèles (MARINE, ATHYS...) développée par le SCHAPI est aussi intégrée dans la catégorie des modèles hydrologiques, bien qu’elle dispose aussi d’un module dédié à la propagation. En ce qui concerne les modèles hydrauliques, les modèles utilisés par le SPC VCB sont les modèles Mike et Mascaret. Le logiciel Mike, développé par l’entreprise DHI, est un logiciel payant permettant la modélisation hydraulique 2D des cours d’eau. Le logiciel Mascaret, développé par le consortium TELEMAT-MASCARET, est un logiciel libre permettant la modélisation hydraulique 1D. Dans cet article, la mise en place des modèles Mike sera abordée mais ceux-ci ne seront pas pris en compte dans l’analyse comparative puisque ces modèles ne sont pas utilisés dans la production de la vigilance en temps réel. D’autre part, les travaux du SPC Maine Loire Aval ainsi que du CEREMA ont permis l’émergence du plugin Mascaret qui a tout simplement rendu possible la construction, le calage, la validation à grand rendement des modèles hydrauliques 1D (Barthélémy et al., 2017). Le Tableau 1 présente de manière succincte le classement des différents modèles utilisés au sein du SPC VCB.

Tableau 1 : Catégorie des différents modèles présentés dans cette étude

Catégorie de modèle	Modèles statistiques	Modèles hydrologiques	Modèles hydrauliques
Nom de modèle	Ahlys, Phylou	GRP, Plathynes	Mascaret

Afin d’estimer l’impact de la stratégie de modélisation sur la qualité des prévisions, l’ensemble des points de prévisions publiés par le SPC VCB, depuis sa création, est analysé. Un point de prévision correspond à une valeur de hauteur et/ou de débit prévue pour une station à une date donnée. L’évolution du nombre de points de prévision permet de rendre compte de l’activité de prévision du SPC VCB au fil du temps. La conformité des points de prévision est ensuite estimée pour chaque année hydrologique. Un point de prévision est considéré comme étant conforme si la valeur observée appartient au fuseau d’incertitude estimé en ce point. Si l’observation est en-dehors, il est alors considéré comme non-conforme. Cette conformité est ensuite comparée sur différentes périodes de 4 ans : de 2007 à 2011, de 2011 à 2015, de 2015 à 2019 et enfin de 2019 au 23 mai 2023 (année en cours). Pour chacune de ces périodes, la moyenne du pourcentage de conformité annuel est calculée.

4. Résultats

La Figure 1 A. présente l'évolution du nombre de stations de mesure présentant une sortie de modèle en fonction du temps tandis que la Figure 1 B. présente le pourcentage de stations modélisées par catégorie de modèles. Pour ces deux figures, les figurés oranges correspondent aux modèles statistiques, les figurés bleus correspondent aux modèles hydrologiques, tandis que les figurés rouges correspondent aux modèles hydrauliques. Il est important de noter que si plusieurs modèles couvrent une même station, celle-ci est comptée plusieurs fois. En complément d'information, les RIC 2014, 2017 et 2019 contenait respectivement 42, 50 et 67 stations Vigicrues avec prévision.

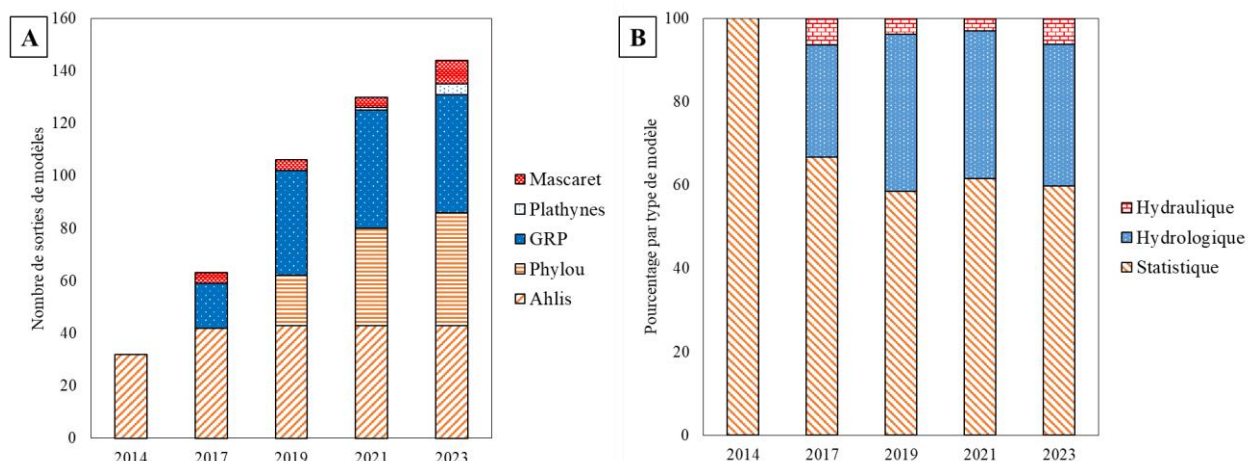


Figure 1 : A. Nombre de stations Vigicrues (prévision et vigilance) couvertes par un modèle en fonction du temps et B. Pourcentage du nombre de stations couvertes par un certain type de modèle en fonction du temps

Les Figure 1 A et B illustrent le fait qu'en 2014 le SPC VCB ne disposait que de modèles statistiques sur 32 stations. À partir de 2017, une diversification des modèles est observée, avec la création de modèles hydrologiques (GRP) et hydrauliques (Mascaret), bien que les modèles statistiques restent majoritaires en termes de stations couvertes (67,7% de modèles statistiques d'après la Figure 1 B). Il est important de noter que toutes les stations ne sont pas éligibles aux mêmes types de modèles, les modèles statistiques étant les modèles les plus adaptables. En 2019, cette diversification s'amplifie avec l'apparition du modèle Phylou et une augmentation du nombre de stations prises en compte par les modèles GRP. De 2017 à 2019, le nombre de sorties de modèle de prévision passe de 63 à 106, soit une augmentation du nombre de stations disposant d'un modèle de 69 %. Cette augmentation est la plus importante sur la période étudiée. De 2019 à 2021, le nombre de sorties de modèles est encore en augmentation, passant de 106 à 130 (22,8 % d'augmentation). Malgré ces augmentations, de 2019 à 2021 le pourcentage des différentes catégories de modèles est relativement stable (Figure 1 B). Cela traduit le fait que les modèles statistiques évoluent à peu près dans les mêmes proportions que les modèles hydrologiques. De 2019 à 2021, les modèles hydrauliques restent minoritaires. D'autre part, l'année 2021 correspond à l'année d'apparition des modèles Plathynes, qui appartiennent à la catégorie des modèles hydrologiques. De 2021 à 2023, bien que le nombre de sorties de modèles passe de 130 à 144 (11 % d'augmentation), le nombre de modèles Ahlis, Phylou (tous deux statistiques) et GRP n'évoluent pratiquement pas. Cependant, le nombre de modèles Plathynes et Mascaret augmente :

- De 2021 à 2023, le nombre de stations modélisées à l'aide de Plathynes passe de 1 à 4 ;
- Sur cette même période, le nombre de stations modélisées grâce à Mascaret passe de 4 à 9.

La période 2017 à 2019 correspond à la période la plus active en termes de création de modèles statistiques et hydrologiques, avec un taux d’accroissement annuel qui atteint respectivement 23,8 % et 67,6 % pour ces catégories de modèle. Les taux d’accroissement des modèles statistiques et hydrologiques s’atténuent ensuite. De 2021 à 2023 les modèles hydrauliques connaissent un taux d’accroissement annuel de 62,5 %. La Figure 2 présente le nombre de points de prévision (axe en noir) et l’évolution de leur conformité pour chaque année hydrologique de 2007 à 2023.

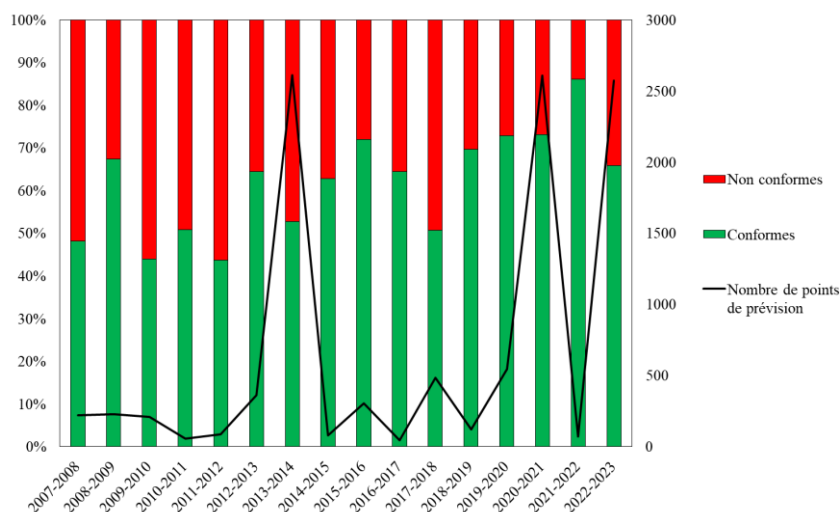


Figure 2 : Nombre de points de prévisions et évolution de leur conformité

La majeure partie des années présente un nombre de points de prévision compris entre 0 et 500, à l’exception notable de 2013-2014, 2020-2021 et 2022-2023 pour lesquels le nombre de points de prévision dépasse légèrement 2500 points. Le Tableau 2 correspond à la moyenne des pourcentages de conformité annuelle pour différentes périodes de 4 ans. Ces valeurs moyennes augmentent constamment au fil du temps, passant de 52,6 % pour 2007 – 2011 à 74,5 % pour 2019 – 2023. L’objectif fixé par le SCHAPI est d’atteindre 80 % de conformité.

Tableau 2 : Moyenne des pourcentages de conformités annuelles pour chaque période de comparaison

	2007 - 2011	2011 - 2015	2015 - 2019	2019 - 2023
Conformité moyenne	52,6 %	55,9 %	64,2 %	74,5 %

5. Discussion

5.1. Stratégie de déploiement des modèles statistiques, hydrologiques et hydrauliques

La Figure 1 A et B traduisent les différentes trajectoires prises par le SPC VCB en termes de stratégie de modélisation, tandis que la Figure 2 rend compte des conséquences de ces stratégies sur la qualité des prévisions. Ces évolutions correspondent :

- au changement de cadre réglementaire lié à l’intégration de nouveaux tronçons au RIC pour lesquels de nouveaux modèles ont été produits afin d’élaborer la vigilance ;

- à l'apparition d'évolutions techniques tels que la Plateforme Hydro Centrale (PHyC) et la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM) toutes deux développées par le SCHAPI, centralisant l'accès aux données, l'utilisation temps réel des modèles et la prise en compte de plusieurs scénarios météorologiques ;
- à l'évolution des besoins en sécurité civile, à savoir le passage de la prévision de la pointe de crue à la prévision de l'ensemble de l'hydrogramme (et limnigramme) et *in fine* à la production de cartes d'inondation avec les modèles hydrauliques.

À partir de 2015, le développement à grande échelle des modèles hydrologiques de type GRP est lancé sur toute la région Bretagne. Pour permettre la pérennité des modèles de prévision, le SPC VCB prend la décision d'incorporer un maximum de modèles sur la chaîne nationale développée par le SCHAPI, via la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM), créée en 2014 et installée en 2016 au SPC VCB, à l'exception des modèles Mike qui ne sont pas compatibles avec la POM. En parallèle des modèles hydrologiques, des modèles hydrauliques 1D sont peu à peu développés à partir du logiciel Mascaret. Entre 2016 et 2018, les travaux conjoints du Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA), du SPC VCB et du SCHAPI permettent l'intégration successive dans la POM de deux modèles Mascaret 1D du tronçon de l'Odet (Tiberi-Wadier, 2017) et de la Laïta. Les résultats de simulation de ces deux modèles permettent en particulier d'améliorer la prise en compte de l'interaction entre le signal de marée et les débits en provenance de l'amont pour ces deux tronçons finistériens. En octobre 2019, le SPC VCB dispose de suffisamment de modèles de prévision pour permettre une publication graphique des stations de prévision et de vigilance. En 2019, un nouveau modèle de prévision hybride (en partie à base physique mais utilisant aussi des corrélations empiriques) intitulé Phylou est mis en place. En 2020-2021, la stratégie de modélisation se diversifie : les premiers calages de modèles hydrologiques Plathynes sont effectués et le nombre de modèles Mascaret intégrés sur la POM passe de 2 à 5 modèles couvrant 9 stations distinctes. Le SPC VCB dispose à ce jour de 48 modèles de prévisions sur l'ensemble de son territoire dont 2 modèles statistiques (Ahlis et Phylou), 37 GRP, 4 Plathynes et 5 Mascaret (trois en phase de test et deux en opérationnel). Bien que la diversification des modèles soit effective, il est important de noter que les modèles statistiques restent majoritaires au sein du SPC VCB (59,7 % de sorties de modèles d'après la Figure 1 B). Cela est lié au fait que les modèles statistiques s'adaptent généralement à l'ensemble des stations disponibles contrairement aux modèles hydrologiques et hydrauliques. Parallèlement à cette démarche de calage de nouveaux modèles hydrologiques, le SPC VCB a développé la prise en compte des incertitudes sur les prévisions de hauteur et de débit. Les intervalles de prévisions graphiques publiés sur Vigicrues prennent en compte les incertitudes liées aux prévisions de pluie et aux modèles hydrologiques et hydrauliques. La communication de ces incertitudes permet une meilleure anticipation des scénarios probables pour l'utilisateur.

5.2. Limites, apports actuels et futurs des modèles hydrologiques et hydrauliques

La relative rapidité de calage des modèles hydrologiques de type GRP a permis l'explosion du nombre de modèles de ce type au sein du SPC à partir de 2017-2019. Ces derniers proposent des avantages multiples tels que : (i) la rapidité de calage, (ii) la prise en compte de multiples scénarios météorologiques, (iii) l'existence d'une chaîne intégrée d'évaluation des incertitudes, (iv) le recalage sur les dernières observations de débits (v) la compatibilité avec la chaîne de production de la vigilance des SPC. Par ailleurs, ces modèles augmentent les horizons de prévision quand ils sont associés aux modèles hydrauliques. Point de bascule dans la stratégie de modélisation, la modélisation hydraulique 1D sous Mascaret répondait à plusieurs impératifs :

- la ré-acquisition de compétence en régie suite au départ du modélisateur Mike ;
- la reprise en main de la cartographie issue de Mike ;
- la compatibilité avec le socle national de modélisation temps réel ;
- la nécessité de passer par du 1D et non du 2D, pour les contraintes de temps de calcul en temps réel ;
- la possibilité de modéliser, sur des bases physiques, les secteurs pour lesquels la relation hauteur/débit n'est pas univoque, et où les outils de modélisation transformant la pluie en débit puis en hauteur sont inopérants.

Ce dernier cas est extrêmement fréquent en Bretagne, avec des points de mesure, et de prévision, voire de vigilance, qui sont soumis à des influences aval variables : secteurs sous influence maritime, ouvrages utilisés pour la navigation. Il est difficile de résumer l'ensemble des limites franchies ou à franchir pour l'ensemble des modèles actuels et futurs. Cependant, deux territoires permettent d'illustrer certaines réussites techniques ainsi que des limitations liées à la complexité de certains territoires : l'Odet et Morlaix.

L'Odet est modélisé par le biais d'un couplage entre trois modèles GRP (représentant trois bassins versants amont distincts) et un modèle Mascaret. Les bassins versants intermédiaires modélisés par les modèles GRP présentent des orientations différentes (globalement au Nord, Nord-Est et Est) et des étendues couvertes distinctes (de 111,6 km² à 201,6 km²). Cette répartition des modèles GRP permet une spatialisation relativement fine des précipitations, une différenciation des temps de réponse et un gain important en prévision. D'autre part, le modèle Mascaret permet une modélisation fine des marées.

En opposition, la modélisation du bassin versant de Morlaix est particulièrement complexe. En effet, ce cours d'eau combine de très nombreux défis techniques. En premier lieu, les affluents de cette rivière (le Queffleuth et le Jarlot) forment une confluence dans un réseau de tunnels enterrés sous le centre-ville historique. Le bassin versant de Morlaix présente des temps de réaction courts (à peu près 6h). Ce territoire est, de plus, soumis à un fort ruissellement et à la marée (tunnels compris). L'ensemble de ces contraintes constitue un obstacle quant à la mise en place d'un modèle hydraulique.

Bien qu'à ce jour les modèles hydrauliques soient minoritaires par rapport aux autres modèles (Figure 1 A et B), ces derniers sont amenés à se développer au cours des prochaines années. Cette dynamique est déjà visible en 2023. La couverture complète du réseau surveillé par les modèles Mascaret est en cours, avec actuellement 5 tronçons modélisés en 4 ans, soit 33 % des tronçons surveillés actuellement. À la suite de ces réalisations, les cartographies sont à créer (sur les Côtes d'Armor principalement) ou à remettre à jour pour les modèles historiquement développés sous Mike. Au-delà de la représentation cartographique qui en découlera, la couverture du territoire ouvre de grandes perspectives en termes d'extrapolation des relations hauteur/débit au-delà des plus forts débits connus, et la capacité à prévoir les hauteurs sur les secteurs sans courbe de tarage (relation hauteur/débit non univoque en raison d'influence aval variable : marée, ouvrages mobiles nombreux sur les rivières navigables de Bretagne).

5.3. Apport global du multi-modèles

Les différents types de modélisation développés ont permis un gain important en termes de qualité des prévisions émises, avec une approche multi-modèles permettant d'identifier (i) la convergence plus ou moins forte des sorties des différents modèles et (ii) les incertitudes plus ou moins forte liées à la modélisation hydrologique et hydraulique. A moyens humains quasi-constants, avec un passage de 42 stations Vigicrues en 2014 à 67 stations Vigicrues en 2019 (en partie du fait du nouveau RIC), le suivi annuel de la qualité des prévisions montre une amélioration nette de la fiabilité des points de prévision

(Figure 2 et Tableau 2). Cette tendance à l’amélioration ressort sur les dernières années, en lien direct avec l’amélioration de l’offre de modélisation au sein du SPC VCB. Cette amélioration passe également par une prise en compte accrue de l’incertitude des sorties de modèles dans la production de la vigilance. Cette prise en compte reste cependant difficilement quantifiable au sein du SPC VCB.

D’autre part, deux facteurs ont très probablement favorisé une augmentation de la fiabilité :

- L’amélioration des produits de prévisions fournis par Météo France pour la prévision des scénarios météorologiques.
- Une plus grande automatisation de la chaîne, qui diminue le temps opérateur du prévisionniste, au profit du temps d’expertise.

6. Perspectives futures

Les tendances actuelles appliquées aux prochaines années impliquent une diversification toujours plus importante du panel de modèles disponibles (Figure 1 A et B) avec un rattrapage des approches statistiques et hydrologiques par la modélisation hydraulique. Cette tendance d’augmentation de la proportion des modèles hydrauliques devrait se poursuivre car il reste de nombreux secteurs à propagation sur lesquels la modélisation hydraulique serait pertinente. D’autre part des modèles ont été finalisés ou sont en cours de finalisation par le CEREMA sur les tronçons du Meu, de l’Ille, du Trieux et de l’Oust (ajout de neuf stations). Ceux-ci seront intégrés *in fine* sur la POM.

De manière générale et au vu des résultats présentés, il est possible d’observer trois phases distinctes quant à la stratégie de modélisation passée, actuelle et future. Une première phase de la création du SPC à 2014, caractérisée par la création et la consolidation des modèles statistiques. Une deuxième phase de 2014 à 2019 marquée par l’entretien et le renouvellement des anciens modèles, par la diversification des modèles utilisés et par l’augmentation drastique des modèles hydrologiques. Une troisième phase à partir de 2019 qui pourrait correspondre à encore davantage de diversification dans les outils de prévision et une augmentation importante de la proportion de modèles hydrauliques. Cette stratégie de modélisation pourrait être comparée au sein du réseau Vigicrues afin de constater si ces adaptations aux enjeux et au type de modélisation sont similaires entre SPC ou non. Le Tableau 3 propose une classification qualitative de l’apport opérationnel et du coût de développement des grands types de modèles en usage, d’après l’expérience du SPC VCB.

Tableau 3 : Bilan du déploiement des modèles au SPC VCB

Ordre global de déploiement des modèles au SPC VCB			
	Modèles statistiques	Modèles hydrologiques	Modèles hydrauliques
Débit maximum	X	X	X
Hauteur maximum (stations sans courbe de tarage)	X		X
Prise en compte des ouvrages	X		Variable
Prévision continue		X	X
Production cartographique			X
Temps moyen de développement	Quelques jours	Quelques jours	Plusieurs mois pour un cours d’eau
Temps de calcul	Quelques secondes	Quelques dizaines de secondes	Quelques minutes (1D)

7. Conclusion

La stratégie de modélisation mise en place a eu plusieurs conséquences sur la production de la vigilance crues : (i) une amélioration de la prise en compte de la dynamique des crues pour le prévisionniste ; (ii) un développement de l’analyse multi-critères et de la comparaison de différents modèles, (iii) une modification importante de la prise en compte des incertitudes tant pour le

prévisionniste que pour l'utilisateur final, (iv) par suite un gain important en fiabilité pour les actions de sécurité civile. En passant de la vigilance sur observation à la vigilance à 24 heures d'échéance, la stratégie de modélisation a permis de passer de l'annonce de crues à la prévision des crues. La dernière étape constituée par les modèles hydrauliques a enfin permis de passer de la prévision des crues à la prévision des inondations, en ajoutant la possibilité de faire de la cartographie en dehors des stations Vigicrues. Avec le projet de couverture totale, les SPC devront étendre la production de la vigilance à l'ensemble du territoire. Dès lors, de nouveaux modèles devront être développés. Ces derniers devront s'adapter : (i) à la disponibilité des données, (ii) à la zone d'étude bien plus étendue qu'auparavant, (iii) aux contraintes de temps qu'impose la production de la vigilance. En investissant de nouveaux territoires, il est probable qu'à moyen terme le même schéma de montée en gamme de l'offre de modélisation soit reproduit : (i) mise en place dans un premier temps d'un outil simple et polyvalent, à temps de calcul réduit, puis (ii) construction d'une approche multi-modèles améliorant l'expertise produite. Cette dynamique aura pour moteurs principaux les gains en productivité des chaînes opérationnelles (temps de calcul et ergonomie) ainsi que des attentes toujours plus grandes des citoyens et des acteurs de la sécurité civile, dans un contexte de changement climatique qui rend chaque année plus probable la survenue d'événements extrêmes et hors des conditions de calage. Localement, le SPC VCB devra poursuivre la prise en compte de l'incertitude dans ses modèles, que ce soit dans l'intégration des données en entrée (données météorologiques) mais également sur la diffusion de ces incertitudes au niveau des interfaces entre modèles hydrologiques et hydrauliques (Tiberi-Wadier, 2017), afin de mieux communiquer auprès des acteurs de la gestion de crise sur la réalité de l'information qui leur est transmise.

8. REFERENCES

- Barthélémy S., Ricci S., Rochoux M., Le Pape E., and Thual O.. Ensemble-based data assimilation for operational flood forecasting – On the merits of state estimation for 1D hydrodynamic forecasting through the example of the “Adour Maritime” river. *Journal of Hydrology*, 552:210–224, Sept. 2017. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.017.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat. INPG, 287 pages.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Règlement de surveillance, de prévision et de transmission de l'Information sur les Crues, SPC Vilaine et Côtiers Bretons, Novembre 2019, https://www.vigicrues.gouv.fr/ftp/RIC/RIC_SPC_VCB.pdf
- Tangara, M., 2005. Nouvelles méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat. Cemagref (Irstea), Antony, 374 pages
- Tibéri A. Prévisions d'ensemble hydrologiques et hydrauliques pour la vigilance crues, Thèse, CEREMA, EDF R&D, CERFACS et SCHAPI. Septembre 2021
- Yang, X., 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Thèse de doctorat. ENPC, 205 pages