



PO FEDER 2014-2020

Projet de Recherche : ReNovRisk-Transferts
Recherche intégrée et innovante sur les risques naturels
Aléas cycloniques sur la zone atelier « Massif du Maïdo – Littoral – Lagon »

Fiche Action 1.04 :
« Améliorer les compétences au service de l'économie de la connaissance »

N° Convention : GURDTI/20191772-001881

N° Synergie : RE0001881

ACTION 2 : Aléas Hydrologiques

L2.3.1 Rapport d'analyse des performances des outils de prévision



Fiche Action	1.04 : « Améliorer les compétences au service de l'économie de la connaissance »
Opération	RENOVRISK-TRANSFERTS Recherche intégrée et Innovante sur les risques naturels. Aléas cycloniques sur la zone atelier « Massif du Maïdo – Littoral – Lagon »
N° Convention	GURDTI/20191772-001881
N° SYNERGIE	RE0001881
Action	2 : Aléas hydrologiques
Porteur du projet	Jean-Pierre Cammas, Observatoire des sciences de l'univers de la Réunion (OSU-R)
Contributeurs à la réalisation de l'action	Andréassian Vazken, Astagneau Paul, Bourgin François, Delaigue Olivier, de Lavenne Alban, Nicolle Pierre, Perrin Charles, Piazzzi Gaia, Royer-Gaspard Paul, Thirel Guillaume, Tilmant François, Viatgé Julie
Laboratoire	UR Hydrosystèmes continentaux anthropisés (HYCAR), équipe Hydrologie des bassins versants (HYDRO)

Pour citer ce rapport :

Bourgin, F., Royer-Gaspard, P., Piazzzi, G., Astagneau, P., Thirel, G., de Lavenne, A., Delaigue, O., Tilmant, F., Andréassian, V., Perrin, C. (2023). Rapport d'analyse des performances des outils de prévision. Rapport final du projet de recherche ReNovRisk-Transferts, Action 2 Aléas hydrologiques, OSU Réunion, INRAE (UR HYCAR, Antony), 37 pp.

Résumé

La prévision des crues est un domaine complexe car les chaînes de prévision doivent tenir compte de nombreuses sources d'incertitude, qui affectent les entrées météorologiques observées et prévues, la structure et les paramètres des modèles hydrologiques impliqués, ainsi que les données assimilées en temps réel pour corriger les erreurs de prévision, au rang desquelles le débit observé à l'instant de prévision constitue souvent une information primordiale. Dans ce travail, nous avons exploré plusieurs voies d'amélioration des modèles, en particulier la façon d'assimiler au mieux le débit observé, en tenant compte notamment de ces diverses sources d'incertitudes, la sensibilité des résultats du modèle de prévision à la distribution spatiale et aux interactions entre propagation et assimilation des données de débit sur des points amont du bassin versant, et enfin, les gains potentiels à attendre d'une meilleure prise en compte des fortes intensités de pluie dans la représentation des processus dominant au sein du modèle hydrologique de prévision. Ces différents travaux concourent à indiquer que des compromis doivent être trouvés dans la recherche de performances améliorées, entre complexité accrue de la structure du modèle, affinement de la résolution spatiale et complexification des techniques d'assimilation pour prendre en compte explicitement les diverses sources d'incertitude en jeu. Des approches simples peuvent garantir un bon niveau de robustesse et permettre de s'adapter à une grande variété de situations hydrométéorologiques. Ces travaux ouvrent la voie à des outils opérationnels plus flexibles et performants sur des bassins soumis à des événements de pluie intense comme c'est le cas à la Réunion.

SOMMAIRE

Résumé.....	3
Introduction.....	5
Rappel des objectifs généraux	5
Contexte	5
Contenu du présent rapport	6
Assimilation probabiliste de données en modélisation hydrologique globale.....	7
Contexte et objectifs	7
Assimilation séquentielle de données basée sur des ensembles	8
Base de données	10
Modèle	10
Dispositif expérimental	11
Conclusions et perspectives	12
Prévision des crues par modélisation semi-distribuée	13
Contexte et objectifs	13
Matériel et méthodes	14
Résultats.....	17
Discussion.....	20
Conclusions et perspectives	22
Prise en compte des fortes intensités de pluie dans un modèle de prévision des crues	23
Contexte et objectifs	23
Matériels et méthodes.....	24
Modèles.....	25
Calage, mise à jour et évaluation	26
Résultats.....	28
Conclusions et perspectives	32
Conclusion générale	33
Références.....	34

Introduction

Rappel des objectifs généraux

Le projet RenovRisk-Transferts a eu pour but d'étudier les risques naturels associés aux cyclones qui touchent le territoire réunionnais. Il s'est focalisé plus particulièrement sur la zone-atelier du massif du Maïdo située à l'ouest de l'île. Les ravines de ce massif sont alimentées par les précipitations cycloniques et leurs comportements hydrologiques sont encore mal compris malgré les risques extrêmes de crues éclairs et d'inondations sur la bande côtière.

Les travaux relatifs aux risques hydrologiques au sein de l'action 2 du projet se sont attachés à répondre à deux grands objectifs :

1. Développement de modèles de simulation hydrologique à fine échelle spatio-temporelle

Ce premier objectif visait à mettre en place une modélisation hydrologique semi-distribuée pour tenir compte de l'hétérogénéité spatiale des précipitations, et ce afin de permettre de reproduire la dynamique des bassins versants étudiés en crue. L'aptitude du modèle à capter cette dynamique a été étudiée à travers une analyse de sensibilité.

2. Travaux exploratoires sur l'anticipation en temps réel des crues extrêmes

Ce second objectif visait à mettre en place des outils pré-opérationnels d'anticipation des crues, en évaluant leur robustesse et en quantifiant les incertitudes associées aux prévisions. La faisabilité de la mise en place d'outils de prévision opérationnels a également été analysée.

Contexte

Le développement de chaîne de modélisation hydrologique, à fine échelle spatiale et temporelle, permettant de prévoir des événements de crue variés, est une tâche complexe, qui doit tenir compte des nombreuses sources d'incertitudes affectant les prévisions. Parmi ces sources d'incertitudes, on trouve notamment :

- l'estimation des pluies précipitées à l'échelle du bassin versant, que ce soit dans leur observation que dans leur prévision. A la Réunion, le contexte physique et climatique de l'île, avec des gradients orographiques importants, des événements extrêmes très variables dans l'espace et le temps et des difficultés météorologiques à bien rendre compte de cette variabilité, accroissent la difficulté de disposer d'observation fiables sur les entrées pluviométriques réelles. Par ailleurs, la prévision reste encore très incertaine, et l'incertitude croissante avec l'échéance de prévision limite la capacité à étendre beaucoup les échéances de prévision au-delà des temps de réaction des bassins versants aux pluies ;
- l'estimation des débits en rivière reste délicate, du fait notamment des conditions météorologiques lors des événements extrêmes (montées fortes et brutales des eaux, transport solide important dans certains cas entraînant des détarages, etc.). Ceci complique à la fois le calage des modèles et ensuite l'assimilation des débits observés en temps réel ;
- le modèle hydrologique de transformation des pluies en débit, et l'estimation de ses paramètres. Le modèle hydrologique est une triple simplification du bassin versant, en

termes de description des processus, de représentation des échelles de temps et de description spatiale. Les processus à l'œuvre peuvent être nombreux, l'important étant de bien représenter les processus dominants, qui peuvent néanmoins varier suivant la saison ou le type d'événement. Le choix de l'échelle temporelle dépend à la fois des temps caractéristiques des processus à représenter mais également de la résolution, de la quantité et de la qualité des données effectivement disponibles. Enfin, le choix de la résolution spatiale dépend essentiellement du rôle de la variabilité spatiale des processus et des conditions météorologiques sur la réponse du bassin versant. A la Réunion, la résolution effective au sein de la modélisation doit nécessairement être un compromis entre la prise en compte des variabilités et les incertitudes inhérentes à leur description.

Contenu du présent rapport

Le présent rapport détaille les résultats obtenus dans le cadre des travaux de mise au point des modèles de prévision du projet ReNovRisk-Transferts. Les travaux menés se sont essentiellement attachés à trouver des méthodes efficaces d'assimilation des données au sein des modèles hydrologiques et de recherche de compromis entre amélioration de la structure des modèles hydrologiques, de leur résolution spatiale et des techniques d'assimilation de données associées.

Ce rapport fait la synthèse de trois travaux de recherche menés dans cette perspective :

- le travail de post-doc de Gaia Piazzì, qui s'est intéressé au test de techniques probabilistes d'assimilation de données et des gains que l'on pouvait attendre par rapport à des techniques plus simples actuellement implémentées dans des outils opérationnels (Piazzì et al., 2021). Les travaux de comparaison avec un modèle opérationnel de prévision des crues ont été menés ;
- le travail de post-doc de Paul Royer-Gaspard, qui a porté sur le développement d'un modèle spatialisé de prévision, avec une analyse de la sensibilité des résultats du modèle à diverses composantes, notamment dans la représentation des transferts amont-aval et ses impacts sur l'assimilation de données (Royer-Gaspard et al., 2023) ;
- les travaux de thèse et de post-doc de Paul Astagneau, qui se sont intéressés à évaluer des versions améliorées d'un modèle de prévision, qui permettent de mieux prendre en compte les fortes intensités de pluies telles que celles que l'on rencontre à la Réunion (Astagneau et al., 2023).

D'un point de vue méthodologique, il a été fait le choix dans ces différents travaux de recherche, de tester les méthodes et outils sur de larges échantillons de bassins versants, de manière à en tirer des conclusions générales et de ne pas être dépendant de la qualité des données utilisées. Nous avons donc utilisé des échantillons de bassins versants situés en France métropolitaine, pour lesquels nous disposons de bases de données climatiques et hydrologiques de bonne qualité. Les conditions rencontrées sur le pourtour méditerranéen, avec des événements présentant de fortes intensités, ont des similarités fortes avec certains événements rencontrés à la Réunion. Les résultats présentés ici nous paraissent donc transposables au contexte réunionnais.

Ces travaux ont été menés dans une perspective de produire des outils opérationnalisables, conjointement avec les démarches menées à l'échelle nationale avec le SCHAPI.

Assimilation probabiliste de données en modélisation hydrologique globale

Contexte et objectifs

La prise de conscience croissante de l'importance critique de l'incertitude dans les prévisions hydrologiques est un problème commun à la plupart des systèmes de prévision. Blöschl et al. (2019) ont récemment identifié la nécessité de démêler et de réduire les différentes sources d'incertitude dans les prévisions des modèles comme l'un des principaux problèmes non résolus en l'hydrologie. En effet, plusieurs sources d'incertitude peuvent conjointement affecter les simulations des modèles, à savoir les erreurs aléatoires ou les erreurs systématiques dans les forçages du modèle, l'incertitude due aux estimations sous-optimales des paramètres, et les erreurs dues à une structure de modèle incomplète ou biaisée. Par conséquent, les systèmes de prévision opérationnels produisent de plus en plus souvent des prévisions probabilistes plutôt que des prévisions déterministes uniques, ce qui permet de prendre en compte la plupart de ces incertitudes. Depuis plus d'une décennie, l'initiative internationale Hydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) étudie la meilleure façon de générer, de communiquer et d'utiliser les prévisions hydrologiques d'ensemble, produites par une large gamme de chaînes de modélisation (Schaake et al., 2007).

Quelle que soit l'approche de modélisation, la fiabilité des prévisions diminue généralement tout au long de l'horizon de prévision, principalement en raison de l'incertitude inhérente aux conditions initiales (CI) et du comportement stochastique des forçages météorologiques des forçages météorologiques. Des travaux récents ont soutenu que la capacité de prévision des débits est principalement contrôlée par les CI hydrologiques. (par ex. Wood et al., 2016). C'est pourquoi l'intérêt se porte de plus en plus sur l'amélioration des CI de prévision en mettant à jour les états et/ou les paramètres du modèle par l'assimilation des observations disponibles. Pour la prévision des débits en temps réel, l'assimilation des débits observés est le moyen le plus courant d'améliorer la qualité des prévisions, car cette variable hydrologique est sans doute un prédicteur clé et ses mesures sont généralement faciles à obtenir.

Plusieurs techniques d'assimilation de données (AD), différant par leur coût numérique et leur optimalité, ont été proposées et utilisées pour assimiler les données de débit dans les modèles hydrologiques à des fins de prévision (Liu et al., 2012). L'AD séquentielle, également connue sous le nom de filtrage, a suscité un grand intérêt dans les applications en temps réel, car cette approche met à jour de manière séquentielle les prévisions du système lorsque des observations sont disponibles. De nombreux travaux de recherche ont porté sur le potentiel des techniques d'AD séquentielle pour améliorer la qualité des prévisions de débit par le biais du filtre de Kalman (KF ; Kalman, 1960), le filtre de Kalman étendu, le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) ou encore le filtre à particules (PF ; Arulampalam et al., 2002).

Cette étude vise à évaluer comment et dans quelle mesure l'estimation des CI de prévision basée sur l'AD peut effectivement améliorer la précision des prévisions de débit fournies par un modèle conceptuel pluie-débit. L'objectif principal est d'étudier les limites et les potentialités d'un modèle hydrologique parcimonieux lors de l'assimilation des observations de débit en temps réel pour les débits opérationnels. Pour ce faire, cette étude aborde spécifiquement les principales questions qui doivent être examinées lors de la conception de la configuration optimale d'un nouveau système de prévision, de l'analyse des données et de l'analyse des données, ainsi que pour diagnostiquer les déficiences éventuelles des systèmes existants. Plusieurs expériences ont été réalisées afin d'évaluer la sensibilité de l'estimation

des CI de prévision basée sur l'AD à plusieurs sources d'incertitude et à la mise à jour de différents états et paramètres du modèle. Plus précisément, l'étude vise à :

- (1) Étudier les performances de deux techniques d'AD séquentielles basées sur les techniques d'ensemble couramment utilisées, à savoir, les schémas EnKF et PF, dans le but d'évaluer les principales différences en termes d'efficacité et de persistance temporelle de l'effet de mise à jour des CI sur l'horizon de prévision ;
- (2) Évaluer l'impact relatif des incertitudes les plus importantes affectant les prévisions de débit, à savoir l'incertitude des forçages météorologiques, des paramètres du modèle et des états, sur la précision des estimations des CIs basées sur l'AD ;
- (3) Identifier les processus hydrologiques clés dans un modèle conceptuel pluie-débit et donc les états et les paramètres du modèle les plus sensibles à mettre à jour afin de tirer le meilleur parti de l'assimilation des débits observés.

Assimilation séquentielle de données basée sur des ensembles

Deux approches ont été testées ici :

- L'EnKF (Evensen, 1994) fournit une solution analytique au problème d'analyse en approximant les moments de second ordre des distributions de probabilité, tout en supposant des propriétés de distribution gaussiennes. Chaque fois qu'une observation est disponible, une procédure d'analyse est réalisée par pondération optimale entre les valeurs simulées et observées, le degré de correction étant déterminé par leur degré d'incertitude.
- Le filtre particulaire (FP) présente le principal avantage de ne pas nécessiter d'hypothèse restrictive concernant les contraintes de propriétés gaussiennes. Le FP permet de gérer la propagation de distributions non gaussiennes à travers des modèles non linéaires. Selon la méthode d'importance séquentielle (SIS) (Moradkhani, et al., 2005), les particules sont aléatoirement échantillonnées à partir d'une distribution connue et facile à échantillonner. Chaque fois qu'une observation est disponible, les poids d'importance associés aux particules sont mis à jour de manière récursive, en fonction de la probabilité des états des particules par rapport à l'état observé. Les particules sont ensuite correctement pondérées et propagées séquentiellement en appliquant la règle de Bayes pour estimer la distribution postérieure par une combinaison optimale de la distribution antérieure et de la distribution postérieure.

Leur fonctionnement est illustré à la Figure 1.

Parmi les incertitudes qui affectent les prévisions hydrologiques, les forçages météorologiques sont parmi les plus importants. Cependant, il est peu probable que la perturbation des données météorologiques puisse à elle seule représenter de manière exhaustive les incertitudes du système. Afin d'éviter le rétrécissement de l'ensemble, même en l'absence de précipitations, d'autres incertitudes peuvent être représentées par l'introduction d'un bruit stochastique supplémentaire. En effet, alors que la perturbation des forçages météorologiques tient compte des incertitudes dans les données d'entrée du modèle, la perturbation des états et des paramètres du modèle permet de représenter l'incertitude dans le modèle lui-même.

Selon la méthodologie proposée par Moradkhani et al. (2005), à chaque pas de temps d'assimilation après la procédure d'analyse, les états du modèle et les paramètres peuvent être perturbés par un bruit de moyenne nulle normalement distribué. La variance du bruit est supposée égale à la variance des variables internes résultant de la procédure d'analyse. Cependant, afin d'éviter les instabilités du modèle dues à des changements importants dans les variables internes perturbées et dans les paramètres, il est nécessaire d'utiliser un bruit de moyenne nulle (Salamon & Feyen, 2009).

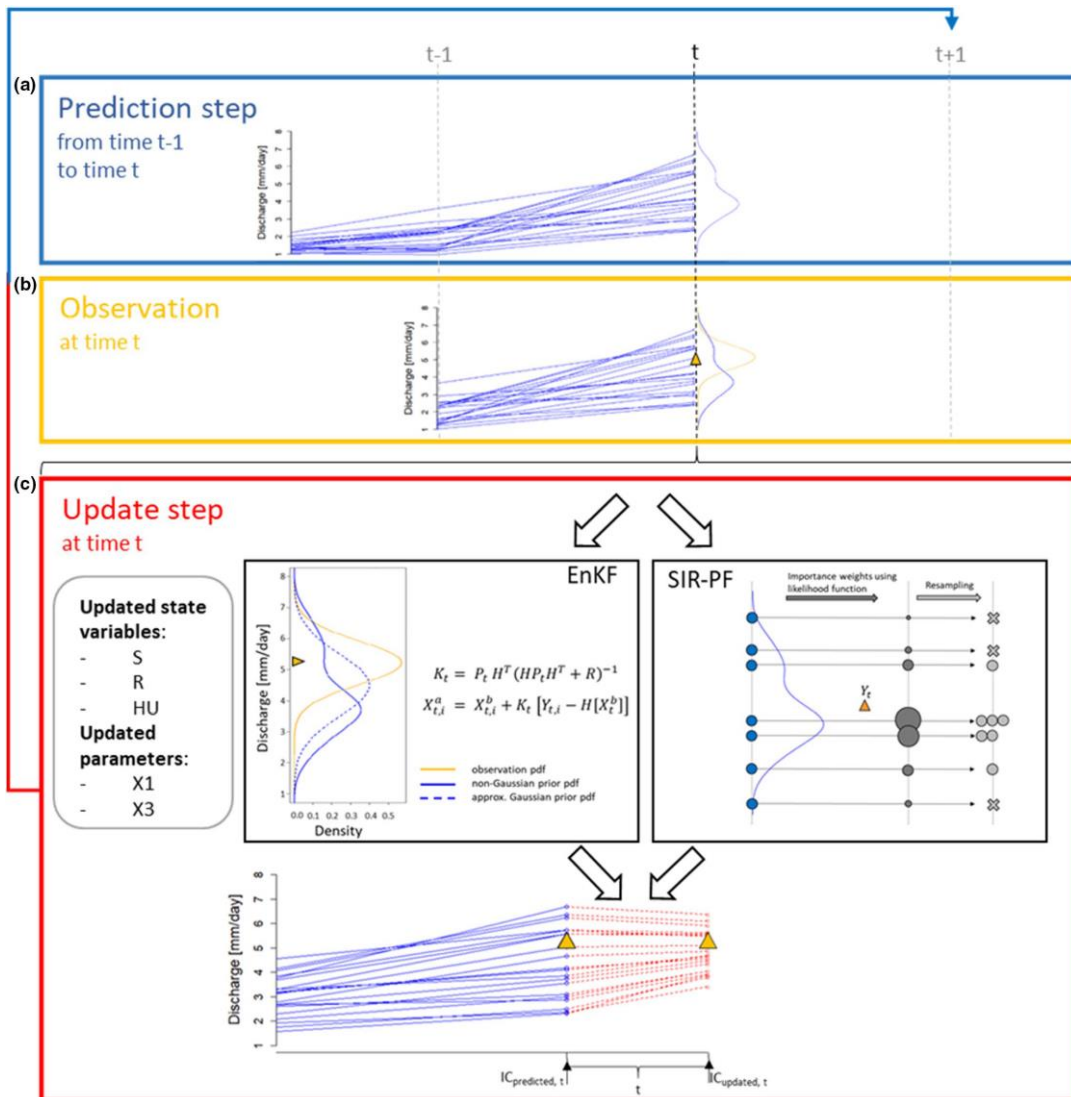


Figure 1. Représentation schématique des algorithmes séquentiels d'assimilation de données (DA). L'étape de prédiction (a) fournit un ensemble d'estimations a priori des états du modèle (c.-à-d. les points bleus ; la courbe bleue est la distribution a priori non gaussienne). Lorsqu'une observation Y est disponible (b) (c.-à-d. le triangle orange). La courbe orange représente la distribution gaussienne des erreurs d'observation, elle est assimilée lors de l'étape de mise à jour (c) pour estimer l'état de l'analyse. Le filtre de Kalman (EnKF) suppose une distribution préalable gaussienne (c'est-à-dire la courbe bleue en pointillés) pour évaluer le gain de Kalman (K_t) et les états d'analyse X_t . Dans le schéma du filtre à particules (PF), les poids d'importance sont mis à jour en fonction de la valeur de vraisemblance de chaque particule par rapport à l'observation. Les tailles des particules (cercles gris foncé) sont proportionnelles à leurs poids. Dans la procédure de ré-échantillonnage, les échantillons dont les poids sont négligeables sont supprimés (croix gris clair), tandis que les échantillons ayant des poids importants sont répliqués (cercles gris clair) afin de restaurer la taille de l'ensemble et d'éviter la dégénérescence du filtre. Comme il s'agit d'un schéma séquentiel, les états d'analyse du modèle propagés (c'est-à-dire les points rouges) résultant de l'étape de mise à jour t (c) sont les états initiaux à l'étape temporelle de prédiction suivante $t + 1$ (a).

Base de données

Afin d'évaluer de manière approfondie la performance des prévisions de débit basées sur l'AD, cette étude s'appuie sur un large échantillon de 232 bassins versants à travers la France, mis en place par Ficchi et al. (2016) (voir localisation en Figure 2). Selon la classification des régimes d'écoulement des rivières françaises par Sauquet et al. (2008), la majeure partie des bassins versants est caractérisée par des régimes d'écoulement pluviaux. Les forçages météorologiques sont dérivés de la réanalyse météorologique SAFRAN (Vidal et al., 2010), fournissant des séries de données de précipitations et de températures au pas de temps journalier, qui sont agrégées à l'échelle du bassin versant. Les données quotidiennes sur le débit des cours d'eau sont disponibles à l'exutoire de chaque bassin versant dans la base de données de la Banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr> ; Leleu et al., 2014). Afin de ne pas nuire à la performance du système de prévision par le biais de l'assimilation d'éventuelles observations peu fiables, la qualité des débits mesurés a été examinée à la fois par l'inspection visuelle des hydrogrammes et par le code de qualité sur la fiabilité de l'observation (Delaigue et al., 2020). La période d'analyse s'étend du 1er janvier 2006 au 31 décembre 2011.

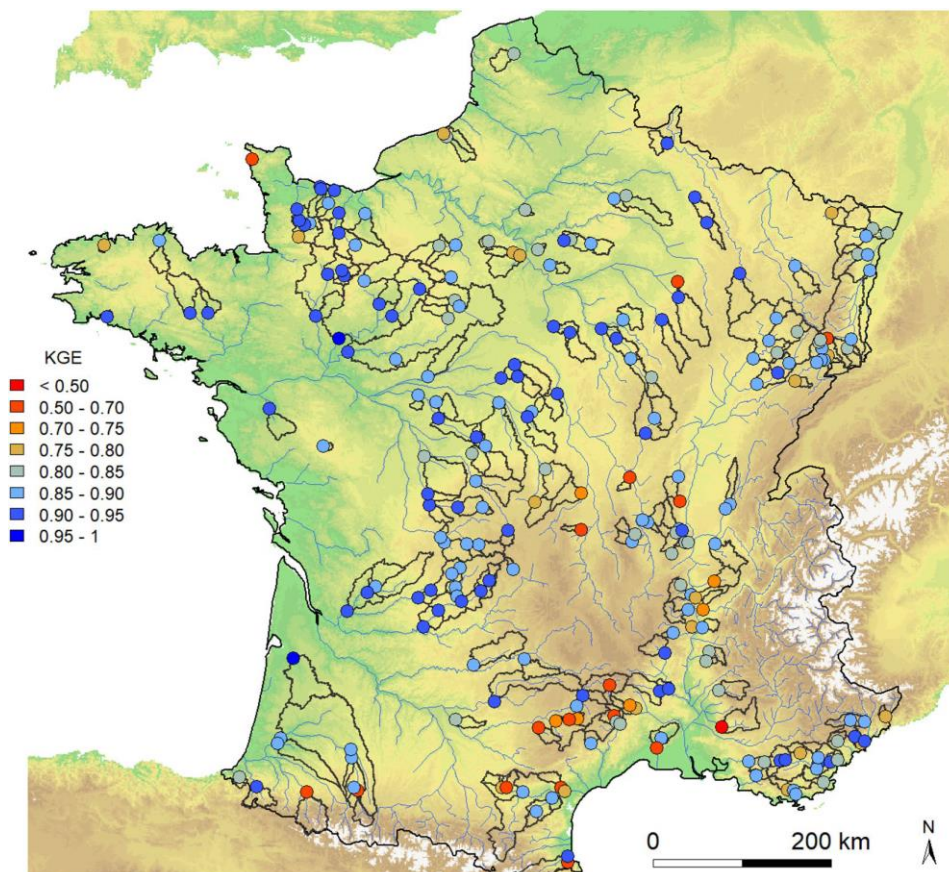


Figure 2. Carte montrant la localisation des 232 bassins français et des stations de mesure utilisées dans cette étude. Les valeurs KGE résultent du calage du GR5J.

Modèle

Les travaux ont été réalisés avec GR5J, un modèle conceptuel journalier (Pushpalatha et al., 2011). Les processus de pluie et de ruissellement sont représentés à l'échelle du bassin versant par une fonction d'interception, deux réservoirs principaux (production et routage), un hydrogramme unitaire et une fonction d'échange (Figure 3). Le niveau du réservoir de

production (S) rend compte de l'évolution de la teneur en eau du sol du bassin versant à chaque pas de temps, en fonction des précipitations qui arrivent dans le réservoir (Ps) et de l'évapotranspiration réelle prélevée dans le réservoir (Es). La fonction de routage repose sur un réservoir de routage non linéaire (R) et un hydrogramme unitaire symétrique pour le décalage du ruissellement. Les états de l'hydrogramme unitaire (UH) définissent le débit qui est acheminé à chaque pas de temps. Les deux composantes du ruissellement (90% et 10% des précipitations effectives Pr, respectivement) sont estimées. Les flux entrants (sortants) de (vers) l'extérieur du bassin sont simulés à l'aide d'une fonction d'échange d'eau souterraine.

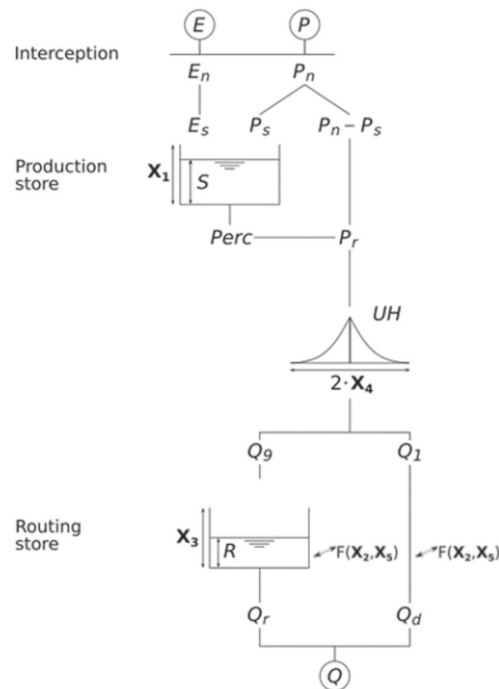


Figure 3. Schéma du modèle hydrologique GR5J (E, évapotranspiration ; P, précipitations ; Pn, précipitations nettes ; En, évapotranspiration nette ; S, réservoir de production ; Perc, quantité de percolation ; R, réservoir de routage ; Qg et Q1, sorties de l'hydrogramme unitaire (UH) ; Q, débit)

Dispositif expérimental

Plusieurs expériences sont réalisées dans le but d'évaluer à la fois l'avantage de mettre à jour différents états et paramètres du modèle et l'impact de la prise en compte de plusieurs sources d'incertitude lors de l'estimation d'un plus grand nombre de paramètres. En effet, l'objectif principal est d'identifier les incertitudes critiques à prendre en compte et les états et paramètres clés du modèle à prendre en compte afin d'améliorer efficacement la capacité de prévision d'un modèle conceptuel. En outre, la performance des schémas EnKF et PF sont évaluées et comparées en termes de précision des prévisions et de persistance temporelle de l'effet de mise à jour. Le Tableau 1 dresse la liste de toutes les expériences réalisées :

- Les expériences "A" visent à évaluer l'utilité de la mise à jour des variables d'état (c'est-à-dire les stocks S, R, UH) en ne considérant que l'incertitude des forçages météorologiques.
- Les expériences "B" sont conçues pour étudier la possibilité de mettre à jour conjointement les variables d'état et les paramètres du modèle (c'est-à-dire X1, X3).
- Les expériences "C" visent à évaluer si l'introduction de l'incertitude des variables d'état peut affecter la mise à jour des CI prévisionnelles basées sur l'AD et l'impact qui

en résulte en termes de performances prédictives.

Tableau 1. Expériences réalisées

<i>Experiment Notes</i>						
Experiment ID	Exps. A		Exps. B		Exps. C	
Updated variables	ICs		ICs and parameters		ICs	
Uncertainty	Met. Inputs		Met. Inputs and model parameters		Met. Inputs and model states	
	EnKF	PF	EnKF	PF	EnKF	PF
1	S, R, UH	S, R, UH	S, R, UH, X₁	S, R, UH, X₁	S, R, UH	S, R, UH
2	S	-	S, R, UH, X₃	S, R, UH, X₃	S	S, R, UH
3	R	-	S, R, UH, X₁, X₃	S, R, UH, X₁, X₃	R	S, R, UH
4	UH	-	-	-	UH	S, R, UH

Note. Updated variables are listed for each experiment; perturbed variables are given in bold. All experiments rely on the same ensemble of perturbed meteorological observations.
Abbreviations: EnKF, ensemble Kalman filter; Exps., experiments; ICs, initial conditions; ID, identification; Met., meteorological data; PF, particle filter; R, routing store level; S, production store level; UH, unit hydrograph state; X₁, production store capacity; X₃, routing store capacity.

Conclusions et perspectives

Nous ne détaillons pas ici les résultats de ces tests, qui peuvent être consultés dans l'article de Piazzì et al. (2021). Nous donnons seulement les principales conclusions de ces travaux :

Lorsque l'on tient compte uniquement de l'incertitude météorologique, les prévisions basées sur l'EnKF sont plus performantes que celles basées sur le PF en termes de précision prédictive. En effet, étant donné que cette dernière technique est plus sensible à la dispersion de l'ensemble, pendant les périodes sans pluie, l'estimation des CI de prévision basée sur le PF peut donner lieu à des prévisions de débit moins précises.

Une représentation complète des incertitudes météorologiques et des incertitudes liées à l'état permet une amélioration plus efficace de la capacité de prévision. En effet, bien que la précision de l'estimation des CI prévisionnelles basées sur le PF soit grandement améliorée, avec un effet de mise à jour plus durable, l'efficacité de l'EnKF n'est améliorée qu'à court terme.

Les résultats montrent que l'incertitude des paramètres peut nuire à la précision des prévisions, car l'estimation des paramètres de prévision basée sur l'AD est susceptible de modifier de manière significative la réactivité hydrologique par la mise à jour des niveaux des réservoirs de production et de routage. Afin d'évaluer plus précisément l'utilité de l'estimation des paramètres de prévision basée sur l'AD, une analyse approfondie devrait être réalisée pour comparer la performance de l'EnKF avec d'autres approches. En outre, l'efficacité du lissage des paramètres par le noyau devrait être étudiée pour prévenir une éventuelle sur- ou sous-dispersion.

Lors de l'utilisation du modèle conceptuel GR5J, l'adéquation des schémas EnKF et PF pour la prévision des débits dépend principalement de l'horizon de prévision et des objectifs ultimes des prédictions. En effet, alors que les CI de prévision basées sur l'EnKF parviennent à améliorer plus efficacement la précision prédictive à l'horizon de la prévision, les CI de prévision basées sur le PF garantissent un effet de mise à jour plus durable sur l'horizon de

prévision. Même si un système de prévision basé sur le FP peut être plus coûteux en calcul en raison du grand nombre de particules nécessaires, cette charge peut être facilement et efficacement gérée par la parallélisation. Dans cette application, les schémas EnKF et FP ne révèlent pas de différence significative en termes de temps de calcul (environ 10 minutes pour effectuer des simulations quotidiennes basées sur l'AD sur une période d'analyse de 6 ans.

Des travaux de comparaison (Piazzì, 2019) ont été menés au pas de temps journalier sur une quarantaine de bassins versants entre le modèle GR5J utilisés avec les méthodes d'assimilation testées (EnKF et FP) et le modèle GRP (modèle opérationnel avec une assimilation directe des débits). Ces tests de comparaison font ressortir globalement :

- Une meilleure performance, quasi systématique, des approches utilisant GR5J avec des approches de filtrage. Cette amélioration est très significative sur la plupart des bassins, mais moindre sur certains bassins du SPC SMYL.
- Les deux approches par filtre donnent des résultats très proches, généralement un peu meilleurs avec le filtre de Kalman d'ensemble à courte échéance par rapport au filtre particulière.

Ces travaux ont aussi souligné le rôle complémentaire de la structure des modèles hydrologiques utilisés et des techniques d'assimilation de données, les deux constituant un ensemble déterminant le niveau de performance accessible. Dans les travaux de comparaison de Piazzì (2019) par exemple, la structure de GR5J semble jouer un rôle déterminant dans l'amélioration des performances par rapport au modèle GRP, comme l'ont confirmé les travaux de Royer-Gaspard (2021). De ce fait, le modèle GR5, au pas de temps horaire ou journalier, a été utilisé, dans les travaux suivants, comme base de travail.

Prévision des crues par modélisation semi-distribuée

Contexte et objectifs

Depuis la création du SCHAPI en 2003, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de l'anticipation des risques d'inondations. Dans celui plus particulier de la prévision hydrologique, ils ont notamment abouti au déploiement opérationnel du modèle GRP (Berthet, 2010) dans la majorité des Services de Prévision de Crues (SPC) en France métropolitaine. Les travaux autour de GRP en ont fait un modèle efficace qui présente également l'avantage d'une structure et d'un schéma d'assimilation simples des débits. Son utilisation à grande échelle a néanmoins débouché sur l'identification de certaines limites qui ont été le point de départ de plusieurs travaux de recherche (e.g. Peredo, 2021 ; Astagneau, 2022). En particulier, la choix d'une représentation « globale » du bassin versant dans GRP prévient la valorisation de données spatialisées de précipitations et l'assimilation dans le modèle d'observations de débit disponibles aux stations amont. Bien qu'une adaptation semi-distribuée de GRP existe (TGR ; Munier, 2009), elle ne donne pas toutes les garanties espérées par rapport au modèle initial, du fait de la simplification de sa structure pour les besoins de l'assimilation de données.

Bien qu'à première vue nécessairement bénéfique, le succès de l'évolution d'une version globale à une version semi-distribuée d'un modèle hydrologique dépend des interactions entre discrétisation spatiale et données à disposition. En effet, il faut être en mesure d'équilibrer la division d'un bassin versant en sous-bassins entre la quantité – souvent

insuffisante – de données disponibles (pour le calage ou l’assimilation de données) et celle – souvent excessive – de paramètres et d’états à contraindre. En matière de calage, des méthodes de régionalisation permettent aujourd’hui d’obtenir des performances souvent au moins aussi bonnes en simulation semi-distribuée qu’en simulation globale (e.g. de Lavenne et al., 2018). En matière d’assimilation de données, l’utilisation de méthodes d’ensemble permettant la représentation des incertitudes aboutit à des résultats encourageants malgré des coûts de calcul importants (e.g. Abbaszadeh et al., 2018 ; Piazzini et al., 2021).

Par ailleurs, la question de la cohérence entre les données de débit est également un problème central, particulièrement en contexte de prévision où les observations servent à corriger les modèles. En effet, il est impératif que les contributions des sous-bassins amont soient correctement estimées pour corriger utilement les états du modèle sur les sous-bassins aval. Or, ces contributions ne sont pas mesurables, et une forte incertitude subsiste quant à la provenance des erreurs lors de l’assimilation de données à l’aval : viennent-elles des estimations de débits produits par les sous-bassins aval, amont ? D’une représentation incorrecte des transferts hydrauliques dans le réseau hydrographique ? Ou bien des observations elles-mêmes ?

Dans cette étude, nous avons cherché à caractériser les bénéfices de l’assimilation des observations de débit aux stations intérieures d’un bassin versant pour la prévision des crues à une station plus à l’aval. Pour cela, nous avons construit GRPS, une version semi-distribuée de GRP. Les travaux ont été conduits pour répondre à deux questions : Comment la précision des prévisions de GRPS se compare-t-elle à celle de GRP ? Quelle est la sensibilité de GRPS aux erreurs dans les apports de débit venant de l’amont, c’est-à-dire à la fois aux erreurs de prévision aux stations amont et aux erreurs de routage ?

Matériel et méthodes

Base de données

L’étude est menée sur un ensemble de 136 bassins versants emboîtés (comportant un total de 285 stations de jaugeage) en France continentale au pas de temps horaire sur la période 1998-2018 (Figure 4). La base de données provient des travaux de Thébaud et al. (2023), et a été construite pour réunir un échantillon suffisamment large pour obtenir des conclusions générales (Addor et al., 2020).

Les séries temporelles sur le débit des cours d'eau proviennent de l'archive nationale Hydroportail (Dufeu et al., 2022), qui fournit des chroniques d’observations des débits des cours d'eau en libre accès pour environ 5000 stations de jaugeage.

Les séries temporelles de précipitations ont été extraites du produit maillé Comephore (Tabary et al., 2012), qui fournit des séries de précipitations horaires à une résolution kilométrique, calculées à partir de mesures in situ et de mesures radar. Les données sur les précipitations ont été spatialement agrégées à l'échelle des bassins versants.

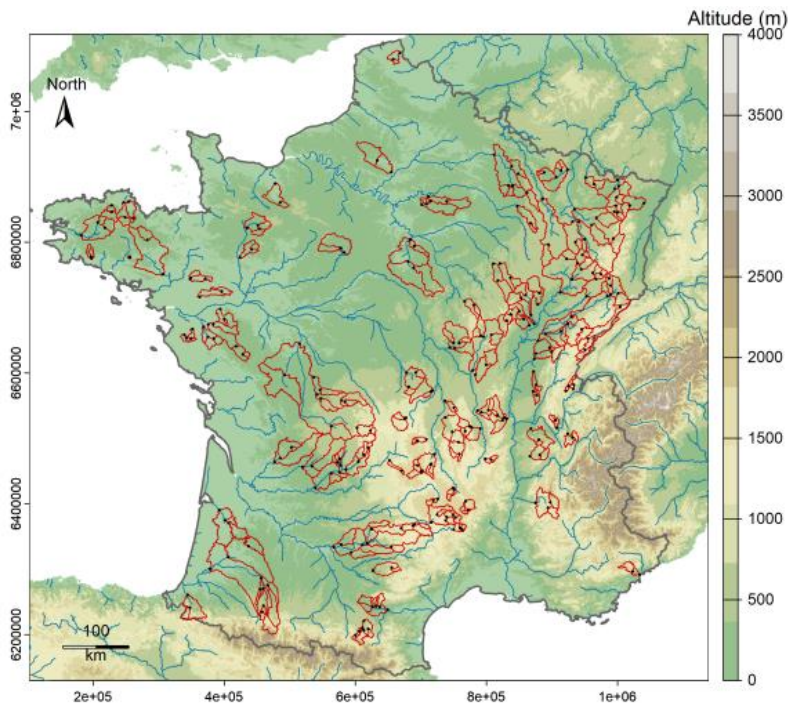


Figure 4. Carte de l'échantillon des bassins versants emboîtés (contours rouges) et des stations de jaugeage (points noirs).

Les températures journalières de la réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010), disponibles à une résolution de $8 \times 8 \text{ km}^2$, ont été utilisées pour estimer l'évaporation potentielle journalière à l'aide de la formule d'Oudin et al. (2005). Les données d'évaporation ont ensuite été désagrégées au pas de temps horaire en supposant une forme parabolique de 6 heures à 19 heures (TU), et une évaporation nulle la nuit. Les données d'évaporation potentielle horaire maillées ont ensuite été moyennées spatialement sur les bassins versants.

Nous avons utilisé des observations climatiques comme scénarios futurs pour alimenter les modèles hydrologiques après l'instant de prévision. Ce choix conduit à des conditions de prévision idéalisées par rapport à l'utilisation d'archives de prévision de pluie, mais permet de se concentrer sur le modèle dans l'évaluation des performances, qui était l'objectif ici.

Principe de la discrétisation spatiale des bassins versants

L'échantillon de bassins versants utilisés dans cette étude a été construit en fonction de leur situation hydrologique, de la disponibilité des données, ainsi que d'une règle spécifique pour définir leur structure spatiale.

Les stations de jaugeage disponibles dans la base de données produite par Delaigue et al. (2020) ont d'abord été filtrées en supprimant tous les enregistrements significativement influencés par les activités humaines. Les bassins versants dominés par la neige (ici plus de 10 % de précipitations solides) ont également été éliminés, ainsi que ceux dont les séries de débit comportaient plus de 10% de valeurs manquantes par an.

L'échantillon de stations ainsi obtenu a ensuite été traité pour créer un ensemble de bassins versants emboîtés. Par "bassins versants emboîtés", on désigne un groupe de stations de jaugeage reliées entre elles par le réseau hydrographique, avec une station de sortie principale en aval et quelques stations en amont. Le processus d'imbrication proposé par Thébault et al. (2023) permet de sélectionner des configurations simples d'emboîtements, avec un seul

niveau de discrétisation amont et la recherche de tailles relativement homogènes des sous-bassins versants amont et du bassin versant intermédiaire (zone entre les stations amont et la station aval) de manière à limiter les problèmes de sensibilité.

En divisant les grands bassins versants profondément emboîtés en de nombreux bassins versants emboîtés de premier ordre, la procédure présente l'avantage significatif de créer un vaste ensemble de données normalisées, avec des bassins versants partageant la même structure spatiale tout en couvrant un large spectre de propriétés physiques.

Sélection des événements de crue

Une sélection d'événements de crue a été effectuée à l'aide d'un algorithme automatique pour i) la détection et ii) la correspondance spatio-temporelle des événements de crue. Le processus a permis de rassembler un total de 1360 événements en configuration semi-distribuée, composés des 10 principaux événements de crue de chaque bassin versant emboîté. L'algorithme de détection a été appliqué à chacune des 285 stations de jaugeage.

L'algorithme définit les événements à partir des pics de crue dans la série temporelle, en commençant par les pics les plus élevés. Les pics inférieurs au 95^{ème} quantile de débit ne sont pas pris en compte. Un événement de crue est défini comme se déroulant entre le moment où le débit devient supérieur à 20% du débit de pointe de l'événement et le moment où le débit redevient inférieur à 25% de cette valeur. Aucune donnée manquante n'est autorisée au cours d'un événement. Un processus de correspondance a été appliqué pour identifier les événements aux stations amont correspondant à un événement à l'exutoire principal, en utilisant une fenêtre temporelle de correspondance tenant compte du temps de propagation dans le réseau hydrographique

Modèles hydrologiques

Le modèle GRP (Berthet, 2010) est un modèle hydrologique avec une structure simple à trois paramètres comprenant un réservoir de comptabilisation de l'humidité du sol, un hydrogramme unitaire et un réservoir quadratique dont la vidange correspond au débit. GRP est conçu pour fonctionner efficacement avec un schéma d'assimilation du débit.

Le modèle GRPS est une configuration semi-distribuée du GRP. La contribution de chaque sous-bassin versant est modélisée avec GRP, et le transfert d'eau d'amont en aval est modélisé par une approche simple de décalage temporel combinée à un réservoir de routage linéaire.

Dans GRP, l'assimilation est effectuée avec une insertion directe du débit observé pour corriger analytiquement le niveau du réservoir. Dans GRPS, l'assimilation des données de débit est effectuée pour corriger les états du modèle des sous-bassins versants à chaque station de jaugeage. Les débits prévus aux stations amont sont ceux prévus par GRP à ces stations. Cependant, à l'exutoire principal, les états du seul sous-bassin versant intermédiaire supportent les erreurs de toutes les autres composantes du modèle, ce qui peut être une cause d'instabilité dans certains cas. Par conséquent, le processus d'assimilation à la station aval divise la correction proportionnellement à la contribution du débit des sous-bassins versants respectifs. D'un côté, la contribution du sous-bassin versant intermédiaire est corrigée par la mise à jour des états du modèle en aval. De l'autre, la contribution des sous-bassins versants amont est corrigée par l'application d'un facteur correctif multiplicatif. La

somme des débits ainsi corrigés est donc égale au débit mesuré à l'aval. Une persistance du facteur correctif est maintenue aux échéances de prévision avec une décroissance exponentielle tendant vers 1 (temps de demi-vie égal au temps de réponse du bassin versant). D'autres formulations de ce facteur correctif ont été testées et se sont révélées moins efficaces.

Évaluation des prévisions

Les modèles ont été évalués en calage-contrôle en divisant les chroniques en deux sous-périodes (1999-2008 et 2009-2018). Le calage de GRPS reprend l'approche séquentielle décrite par Lobligeois (2014). Les prévisions ont été évaluées jusqu'à 5 jours d'échéance (120 h).

Les prévisions des modèles ont été évaluées en prévision à échéance fixe sur le temps de montée de chaque événement, pour caractériser leurs performances du début jusqu'au pic de crue. La phase de montée est déterminante en contexte opérationnel pour déclencher les alertes. Cinq échéances d'évaluation ont été choisies : trois échéances de référence ont été utilisées uniformément dans tous les bassins de l'étude : 1 h, 12 h et 120 h (très courte échéance, échéance intermédiaire et très longue échéance). Deux échéances fixes et spatialement hétérogènes ont également été choisies :

- T_p , qui représente le temps de propagation moyen entre les stations amont et la station aval, pondéré par les contributions de chaque sous-bassin amont au débit aval. C'est en moyenne l'échéance à laquelle arrivent à l'aval les hydrogrammes amont simulés encore sous influence de la dernière assimilation
- T_c , qui représente le temps de concentration du bassin. C'est l'échéance où l'influence de la dernière assimilation est théoriquement complètement estompée, c'est-à-dire à partir de laquelle le modèle de prévision rejoint le comportement d'un modèle de simulation (sans assimilation).

Deux critères de performance ont été utilisés pour l'évaluation des performances :

- Le critère de Nash et Sutcliffe (ou NSE, 1976) est utilisé pour estimer la qualité générale des prévisions. Il varie entre $-\infty$ et 1 (valeur optimale). Le modèle « moyenne » de référence du NSE correspond à la moyenne des observations sur la durée de l'événement évalué, c'est-à-dire sur le temps de montée de chaque crue.
- Le critère C2M (Mathevet et al., 2006) est un critère borné entre -1 et 1 qui compare l'erreur quadratique moyenne d'un modèle relativement à un autre modèle de référence. Dans notre étude, nous avons comparé GRPS à GRP : une valeur de C2M supérieure à 0 signifie que GRPS fait moins d'erreur que GRP.

Résultats

Comparaison de GRPS et GRP

Les distributions des critères calculés sur les événements sont représentées en Figure 5 pour chaque échéance de prévision d'intérêt. A courte échéance, le bénéfice de l'assimilation des dernières observations est maximal, avec donc des performances élevées. La qualité globale diminue ensuite et se stabilise vers l'échéance T_c . Cette échéance correspond au moment où le débit simulé est principalement déterminé par les pluies tombées juste après la dernière

observation assimilée : à ce moment-là, la dernière correction des états du modèle a un effet amoindri et le modèle se comporte plutôt comme un modèle de simulation.

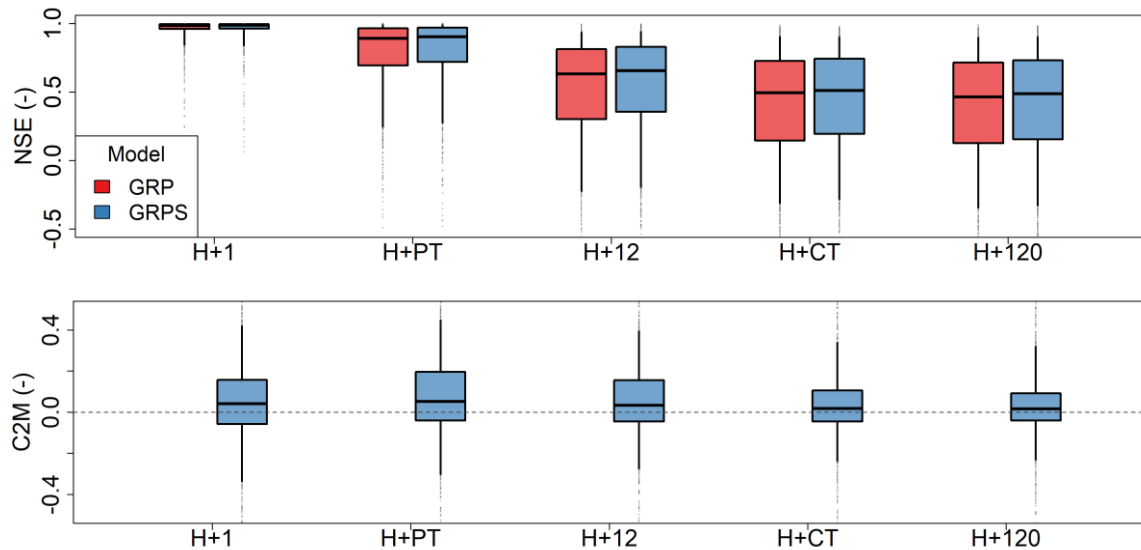


Figure 5. Distribution des performances de GRP et GRPS sur les 1360 événements de crue de l'échantillon pour différentes échéances de prévision.

De manière générale, les distributions des valeurs de NSE des deux modèles sont assez proches. Toutefois, les écarts entre les modèles par événement peuvent être assez importants, ainsi qu'en témoigne les distributions de C2M. Ces distributions montrent un avantage pour GRPS, en particulier à l'échéance T_p , où une majorité des valeurs sont positives. Aux échéances suivantes, cet avantage disparaît et les distributions sont centrées sur zéro. Dans la mesure où T_p est la dernière échéance où une fraction du débit simulé par GRPS est constituée des débits observés à l'amont lors de la dernière assimilation, il était attendu que GRPS affiche une meilleure persistance que GRP à cette échéance.

En appliquant un test de Student aux valeurs de C2M événementielles pour chaque bassin versant, nous avons cherché à quantifier le nombre d'entre eux pour lesquels il est possible de trancher significativement quel modèle choisir entre GRP et GRPS. La valeur p seuil a été choisie à 0.01 compte tenu que le test a été conduit 136 fois. À l'échéance T_p , GRPS et GRP se démarquent dans 22 bassins versants, dont 21 dans lesquels GRPS est significativement meilleur que GRP. À l'échéance T_c , le nombre chute à 9, dont 8 dans lesquels GRPS est significativement meilleur que GRP. Seuls 2 bassins sont communs aux deux échéances. Ce résultat confirme que c'est bien l'assimilation de données observées aux stations intérieures et non pas le caractère semi-distribué du modèle qui est déterminant, autrement les deux modèles se seraient démarqués également à T_c . Ce résultat montre également que dans beaucoup de bassins versants, il n'est pas possible d'identifier un modèle meilleur que l'autre, soit parce que leurs performances sont trop proches, soient à cause de la variabilité d'un événement à l'autre. Il convient malgré tout de noter que le faible nombre d'événements par bassin étudié réduit la significativité du test de Student et donc que le nombre de bassin identifié est vraisemblablement une estimation basse.

Caractérisation des événements vis-à-vis des performances de GRPS

Pour identifier des régularités dans les situations modélisées, nous avons étudié les corrélations entre les performances des modèles et les caractéristiques des événements de crue et des bassins versants. Il est apparu que le facteur explicatif le plus flagrant des valeurs de NSE de GRP et GRPS était le temps de concentration des bassins versants, (également très corrélé à leur taille et l'autocorrélation des débits). Ce résultat (non montré) s'explique à la fois par la plus grande difficulté des modèles hydrologiques à simuler les bassins très réactifs en général (Astagneau et al., 2021), et par la plus faible persistance des bénéfices de l'assimilation car les débits des bassins réactifs sont souvent moins autocorrélés.

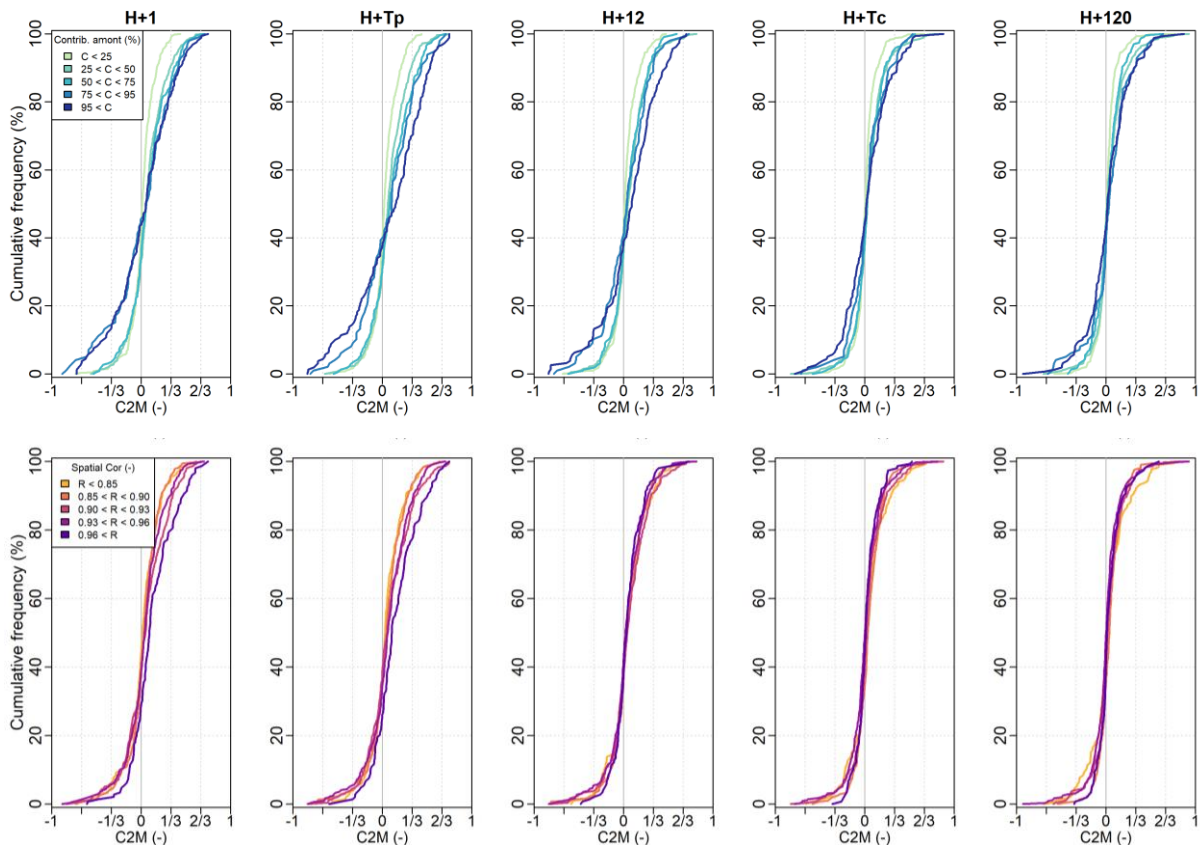


Figure 6. Distribution des performances de GRPS par rapport à GRP par classe d'événements pour différentes échéances de prévision. En haut, les classes d'événements sont construites à partir des contributions relatives des sous-bassin amont. En bas, les classes d'événement sont construites à partir de la corrélation spatiale des hydrogrammes observés aux différentes stations, en prenant en compte le décalage temporel.

Pour ce qui est des facteurs explicatifs des performances comparatives GRPS par rapport à GRP, les distributions de C2M sont montrées en Figure 6 pour différentes classes d'événement. Les premières classes d'événement sont déterminées selon la contribution observée des bassins amont à l'écoulement pendant l'événement. Il apparaît nettement que les performances de GRPS et de GRP se distinguent davantage pour les événements où la contribution amont est plus forte, sans que cela soit pour autant à l'avantage de GRPS en moyenne. Au contraire, les événements où la contribution des bassins amont est la plus faible sont caractérisés par des performances de GRP et GRPS très semblables, ce qui est logique dans la mesure où GRPS est alors très proche d'un modèle global car le bassin aval produit à la fois la majorité du débit et sa contribution n'est pas tributaire d'un transfert hydraulique dans le réseau hydrographique.

Les deuxièmes classes d'événement sont constituées à partir des corrélations spatiales entre l'hydrogramme observé à l'aval et les hydrogrammes observés aux stations amont en tenant compte du décalage temporel. Plus cette corrélation est élevée, plus les hydrogrammes amont ressemblent à l'hydrogramme aval réduit d'un facteur de proportionnalité et décalé dans le temps, et donc plus les sous-bassins versants sont homogènes en terme hydrologique. De ce fait, alors qu'on attendrait que GRPS surpasse GRP dans les bassins emboîtés où les hydrogrammes sont très hétérogènes, c'est l'inverse qui est observé aux échéances inférieures ou égales à T_p . La situation se rééquilibre aux échéances suivantes, et on ne distingue alors plus vraiment de différences notables. Ce résultat indique que la correction des états du modèle du sous-bassin aval lors de l'assimilation est inadéquate, et donc que la contribution modélisée des sous-bassins amont est mal estimée (forme, arrivée du pic, volume).

Discussion

Pour aller plus loin, nous avons cherché à identifier les pistes d'amélioration du modèle semi-distribué, en étudiant les questions liées à la propagation hydraulique et à la qualité des prévisions amont.

Sensibilité au module de propagation hydraulique

Pour comprendre l'effet des erreurs de propagation sur les prévisions, nous avons choisi de comparer les résultats obtenus avec un module de propagation hydraulique plus simple que celui de GRPS, en supprimant la correction distribuée entre états du modèle aval et contributions amont. Les C2M des modèles construits sont présentés en Figure 7. Le modèle le plus simple est GRPS muni d'un module de transfert hydraulique consistant en un simple décalage temporel (GRPS-SL pour « simple lag »). Le modèle intermédiaire est le modèle GRPS muni du transfert hydraulique diffusif mais sans correction distribuée (GRPS-DL pour « diffusive lag »). Le dernier modèle est GRPS tel qu'utilisé précédemment, c'est-à-dire GRPS-DL avec distribution des corrections entre contributions amont et aval.

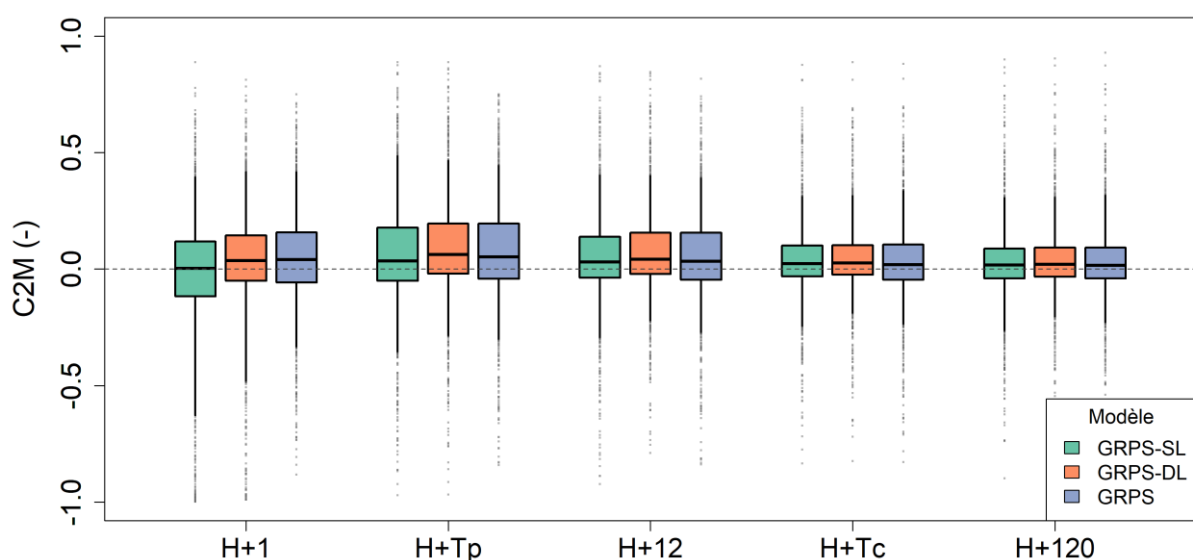


Figure 7. Distribution des performances par rapport à GRP des modèles alternatifs à GRPS pour différents horizons de prévision sur les événements de l'échantillon.

Il apparaît assez clairement que les améliorations dans le schéma de propagation et de correction n’apportent que des gains marginaux sur les distributions, concentrés aux échéances très courtes. À l’échéance H+1, les performances respectives des modèles suivent plutôt bien l’ordre de leur complexité. La médiane des performances est certes faiblement améliorée dès lors que le module de propagation est complexifié, mais la distribution des corrections entre états aval et contributions amont permet de supprimer les valeurs de C2M proches de -1. Les événements correspondants sont ceux où les contributions amont dépassent le débit observé – raison pour laquelle la correction distribuée a été mise en place. En dehors des extrêmes négatifs, les gains sont très mitigés et peu concluants sur l’effet général d’une amélioration des méthodes de propagation hydraulique.

Il faut rappeler que les modules testés sont très simples, et assez éloignés des phénomènes physiques réels à l’œuvre. Néanmoins, en modélisation hydrologique, la méthode du « lag simple » est très répandue car elle a peu d’effet sur les performances en simulation (Pechlivanidis et al., 2010 ; Saulnier et le Lay, 2009 ; Lerat et al., 2012 ; Lobligois, 2014). Il est possible que l’exercice de prévision hydrologique accentue les effets de schéma de routage à cause des interactions avec l’assimilation de données. Dans notre étude, cette hypothèse est étayée au regard des gains de performances à H+1 entre « lag simple » et « diffusive lag », mais il serait nécessaire d’envisager des solutions dérivées des équations de Saint Venant à une dimension pour confirmer cette hypothèse. Avec un module de propagation plus satisfaisant, il serait alors envisageable de concentrer les recherches sur la méthode d’assimilation de données sans suspecter des interactions néfastes avec les erreurs de propagation.

Sensibilité à la qualité des prévisions amont

Les comparaisons de GRP et GRPS mettent en évidence un lien entre l’heure d’arrivée d’hydrogrammes quasi-observés depuis l’amont (au module de propagation près) et l’échéance des gains de performance par rapport au modèle global. Pour aller plus loin dans la caractérisation de l’apport des observations amont, nous avons mis en place un modèle idéalisé dans lequel les prévisions de l’amont seraient parfaites, c’est-à-dire dans lequel les contributions des sous-bassins amont ne seraient que des hydrogrammes observés propagés vers l’aval à toutes les échéances. Les résultats sont présentés en Figure 8.

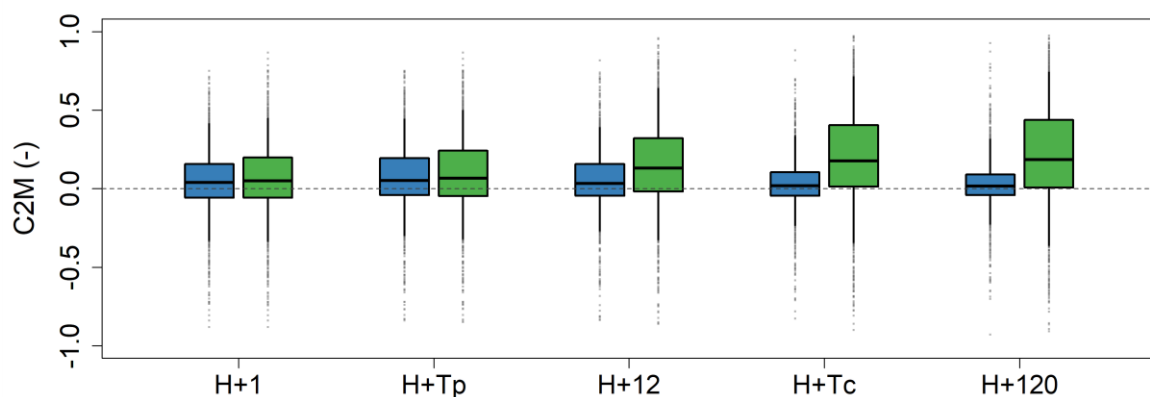


Figure 8. Distribution des performances par rapport à GRP de GRPS (bleu) et de GRPS idéalisé (avec observations amont) (vert) à différents horizons de prévision sur les événements de l’échantillon.

Les résultats montrent que le modèle GRPS idéalisé est bien meilleur que GRPS dès que les échéances de prévision dépassent le temps de propagation des hydrogrammes amont. Ce constat étaye l'hypothèse selon laquelle les gains disparaissent aux échéances suivant T_p à cause de la qualité des prévisions amont. Les excellentes performances du modèle GRPS idéalisé montrent que la qualité des hydrogrammes amont est primordiale pour la modélisation des débits à l'aval dans un modèle semi-distribué, et que la simplicité du module de propagation n'est en moyenne pas le facteur principal.

Enfin, il convient de remarquer que le C2M de GRPS idéalisé est toutefois négatif sur près d'un quart des événements. Ces événements sont ceux où GRP est déjà bon (corrélation du C2M avec le NSE de GRP à $H+T_c$ égale à -0.26), où GRPS était déjà en difficulté face à GRP (corrélation avec le C2M de GRPS par rapport à GRP égale à $+0.46$), et où les contributions amont sont importantes (corrélation avec le pourcentage de contribution amont égale à $+0.35$). Ces caractéristiques montrent que la qualité des prévisions amont ne suffit pas à compenser des erreurs situées ailleurs dans le modèle semi-distribué (erreurs localisées dans les précipitations, robustesse des paramètres, module de propagation hydraulique). On notera enfin que dans les conditions de notre travail, l'amélioration de la qualité des prévisions à l'amont serait synonyme de progrès de la prévision hydrologique globale et donc que le modèle de référence s'en trouverait amélioré à son tour.

Conclusions et perspectives

Ce travail présente les résultats de la discrétisation du modèle de prévision hydrologique horaire GRP sous forme semi-distribuée, appelée GRPS. L'objectif de l'étude est de caractériser l'apport de l'assimilation des observations de débits aux stations intérieures d'un bassin versant pour la prévision des crues à l'aval.

Les modèles ont été comparés sur une base de données de 1360 événements sélectionnés sur 136 bassins versants emboîtés en France continentale sur la période 1998-2018. L'évaluation des modèles a été réalisée en suivant une procédure de calage-contrôle et en utilisant deux critères de performance (NSE et C2M) jusqu'à 5 jours d'échéance de prévision.

Les résultats montrent en moyenne que GRPS surpasse légèrement GRP jusqu'aux échéances correspondant aux temps d'arrivée à l'aval des dernières observations de débit amont. Toutefois, les performances moyennes cachent une très grande disparité d'un événement à l'autre. À mesure que les échéances augmentent, les performances moyennes des deux modèles deviennent comparables. Les événements où GRPS et GRP se démarquent le plus sont ceux où la contribution des sous-bassins versants amont représente une part importante du débit total, sans que cela soit nécessairement à l'avantage systématique de GRPS. Les événements caractérisés par des hydrogrammes observés très semblables aux différentes stations des bassins versants sont généralement mieux simulés par GRPS aux échéances de prévision courtes. Ce résultat trahit des interactions néfastes entre les erreurs de propagation hydraulique des contributions amont et le schéma d'assimilation de données. Un test de sensibilité des performances au module de propagation hydraulique et à la distribution des corrections entre amont et aval lors de l'assimilation montre qu'il est possible de limiter les contre-performances de GRPS sur les événements concernés. Enfin, un test de sensibilité à la qualité des prévisions amont montre que celle-ci est un facteur important de la qualité des prévisions à l'aval, une fois le bénéfice de l'assimilation passé.

Les conclusions de cette étude permettent de franchir un pas de plus vers l'amélioration des outils de prévision en temps réel, en montrant que l'assimilation des observations de débit aux points intérieurs des bassins versants peut être bénéfique, et invitent à envisager le développement et l'évaluation de modèles plus complexes tant sur le plan de la représentation des transferts hydrauliques et des schémas d'assimilation que sur celui de la modélisation globale.

Prise en compte des fortes intensités de pluie dans un modèle de prévision des crues

Contexte et objectifs

Afin d'anticiper au mieux les crues, des systèmes de prévision opérationnelle existent dans de nombreux pays (Pappenberger *et al.*, 2016). Ces systèmes utilisent des prévisions et observations météorologiques afin de prévoir les débits dans les rivières à des échéances allant de quelques heures à quelques jours (e.g. Pagano *et al.*, 2014 ; Wu *et al.*, 2020). Cette transformation est généralement effectuée à partir de modèles hydrologiques qui sont un élément important de ces systèmes de prévision. Malgré les nombreuses améliorations apportées aux systèmes de prévision des crues au cours des deux dernières décennies (e.g. Jain *et al.*, 2018 ; Zanchetta & Coulibaly, 2020), que ce soit au niveau des entrées météorologiques ou en ce qui concerne le développement de modèles plus performants, les prévisions de ces modèles restent entachées de fortes incertitudes (e.g. Berthet *et al.*, 2020 ; Troin *et al.*, 2021 ; Brunner *et al.*, 2021). Les modèles hydrologiques ont notamment des capacités prédictives plus faibles sur les bassins arides et sur les bassins caractérisés par des conditions sèches à certaines saisons (e.g. McMillan *et al.*, 2016 ; Melsen *et al.*, 2018), en particulier lorsque des crues éclair ont lieu (e.g. Hapuarachchi *et al.*, 2011) et lors de fortes intensités de pluie (Astagneau *et al.*, 2021).

Le modèle de prévision des crues GRP (Viatgé *et al.*, 2019) est utilisé en France par la plupart des services de prévision des crues (SPC) du réseau Vigicrues depuis plus de dix ans. Il découle des travaux de Tangara (2005) et Berthet (2010), et a été appliqué sur de nombreux bassins versants français. Sa structure dérive de celle du modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003) et avait été simplifiée pour permettre une valorisation efficace du débit observé. GRP est un modèle déterministe parcimonieux à trois paramètres libres, qui fonctionne du pas de temps infra-horaire au pas de temps journalier. Il intègre une procédure d'assimilation des derniers débits observés en temps réel pour mettre à jour ses états initiaux. Une correction des sorties utilisant l'erreur antérieure est également effectué pour mettre à jour les prévisions futures. Le modèle peut prévoir les débits pour des échéances allant de moins d'une heure à cinq jours, la qualité des prévisions aux diverses échéances étant dépendante de différents facteurs (qualité du modèle, dynamique du bassin, qualité des prévisions de pluie, etc.).

Les retours d'expérience des groupes utilisateurs ont permis d'identifier plusieurs limitations du modèle GRP, en particulier une tendance à la sous-estimation des volumes et pics de crue ainsi qu'un retard à la montée. Par exemple, en juin 2016, la crue exceptionnelle de la Seine, de la Loire et de leurs affluents a été sous-estimée par le modèle GRP (e.g. Peredo, 2021). Plusieurs aspects de la modélisation hydrologique peuvent être à l'origine des difficultés du modèle, parmi lesquels l'estimation des paramètres du modèle, sa structure ou encore la méthode d'assimilation de données employée.

Les travaux de recherche antérieurs sur le modèle GRP ont été conduits en cherchant un compromis efficace entre complexité de sa structure, de l'estimation de ses paramètres et de l'assimilation du dernier débit observé. Le compromis retenu consiste à mettre un poids très important sur le débit observé à l'instant de prévision. La structure qui en découle est une structure simple qui repose sur seulement trois paramètres libres afin de limiter les problèmes d'équifinalité et augmenter la robustesse du modèle. Les procédures de mise à jour du modèle GRP ont un impact très important sur la qualité de ses prévisions.

Dans cette étude, nous cherchons à explorer un autre compromis de modélisation pour la prévision des crues, en particulier lorsque les bassins versants réagissent à de fortes intensités de pluie en conditions de faible humidité antécédente. Dans certains cas, l'assimilation de données ne suffit pas à compenser les limites structurelles des modèles hydrologiques.

Nous cherchons donc à répondre à la question suivante : l'amélioration des performances d'un modèle hydrologique en simulation conduit-elle à une amélioration de la prévision des crues ?

Pour répondre à cette question, nous comparons les prévisions du modèle GRP à celles du modèle GR5H_RI développé spécifiquement pour améliorer la simulation des crues résultant de fortes intensités de pluie (Astagneau et al., 2022). Le modèle GR5H_RI est couplé à une méthode de mise à jour des états initiaux similaire à celle de GRP afin de produire des prévisions jusqu'à l'échéance 24 h.

L'objectif de ce travail est de déterminer s'il existe des différences entre ces deux modèles en fonction des types de crue et des horizons de prévision. Les comparaisons ont été effectuées sur 19 ans de données horaires disponibles pour 229 bassins versants localisés en France métropolitaine sur lesquels 10 652 événements de crue ont été sélectionnés.

Matériels et méthodes

Données

Ce travail est basé sur une grande base de données de 229 bassins versants français (fig. 1) répartis sur le territoire métropolitain. Les activités anthropiques ainsi que la neige ont des influences limitées sur l'hydrologie de ces bassins. Des séries de données au pas de temps horaire ont été utilisées, sur la période 2000-2018, représentant une large gamme de conditions hydroclimatiques.

Nous avons utilisé la réanalyse radar COMEPHORE de Météo-France (Tabary *et al.*, 2012), disponible à une résolution de 1 km², pour constituer des séries temporelles horaires de précipitations agrégées à l'échelle des bassins versants. Les séries horaires d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été calculées à partir d'une désagrégation de séries journalières issues de la formule d'Oudin *et al.* (2005) utilisant les températures SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010). Les séries temporelles de débit ont été constituées à partir d'une extraction des données issues de la Banque Hydro (Leleu *et al.*, 2014). Cette extraction a été effectuée par Delaigue *et al.* (2020). 10 652 événements de crue ont été sélectionnés sur cette base de données à partir d'un algorithme de sélection automatique. Les caractéristiques détaillées de cette base de données sont présentées par Astagneau (2022).

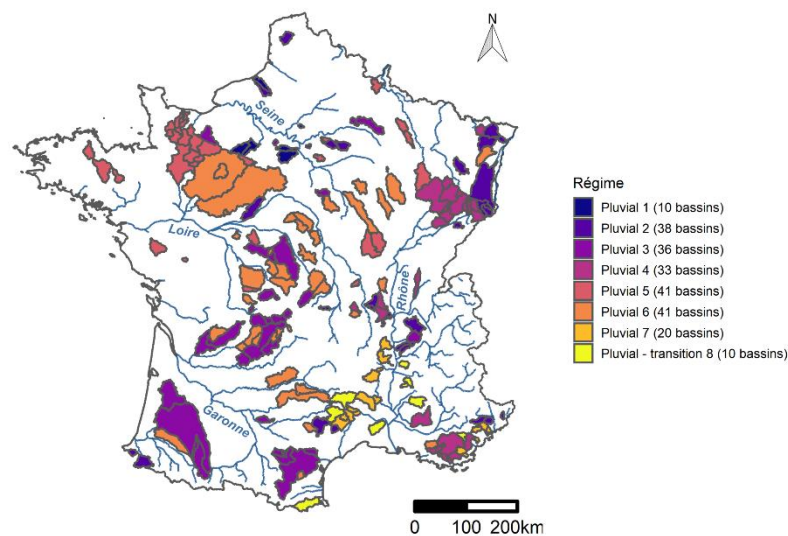


Figure 9 : Localisation des 229 bassins versants en France métropolitaine. Classification en régimes hydrologiques selon la définition de Sauquet et al. (2008).

Modèles

Les séries temporelles de précipitation et d'ETP ont été utilisées en entrée de deux modèles de prévision (fig. 2) :

- le modèle GRP (Berthet, 2010 ; Viatgé et al., 2019) a trois paramètres libres et intègre une procédure de mise à jour du réservoir de routage à partir du débit observé à l'instant de prévision. La procédure de correction des débits à partir de l'erreur à l'horizon 1 h n'est pas activée pour les prévisions évaluées dans cette étude ;
- le modèle GR5H_RI, développé par Astagneau (2022), est une version modifiée du modèle GR5H (Le Moine, 2008; Ficchi *et al.*, 2019), qui vise à améliorer la prise en compte des intensités de pluie. GR5H_RI a huit paramètres libres et intègre une procédure de mise à jour de ses deux réservoirs de routage (voir description de cette procédure dans la section 2.3).

Deux hypothèses de modélisation ont été introduites dans la structure du modèle GR5H afin d'améliorer ses performances lorsque des événements de pluie intenses ont lieu en saison sèche (fig. 3 ; pour plus de détails sur ces hypothèses de modélisation, voir Astagneau et al., 2022 et Peredo et al., 2022). La première hypothèse vise à modifier le rendement de la pluie nette (assuré par le réservoir de production) en fonction de l'intensité de la pluie nette (hypothèse de volume). Le rendement calculé par GR5H dépend uniquement du niveau du réservoir de production (rendement élevé lorsque le niveau du réservoir est haut, c'est-à-dire lorsque l'humidité du bassin est élevée, et vice versa). Dans le modèle GR5H_RI, lorsque l'intensité de la pluie est élevée et le niveau du réservoir de production est bas, le rendement augmente (i.e. il devient différent du rendement initialement calculé par GR5H). Cette modification est contrôlée par le paramètre i_1 . La deuxième hypothèse vise à augmenter la part de la pluie efficace ayant une cinétique rapide lorsque les intensités de pluie sont fortes (hypothèse de répartition temporelle). Dans la structure de GR5H, 10 % de la pluie efficace passe systématiquement par la branche directe de la fonction de routage. Dans le modèle GR5H_RI, cette fraction dépend de l'intensité de la pluie nette. Cette modification est

contrôlée par le paramètre i_2 . Un réservoir linéaire (paramètre K_L) a été ajouté sur la branche directe pour améliorer la simulation des récessions lorsqu'une part importante de la pluie efficace passe par cette branche.

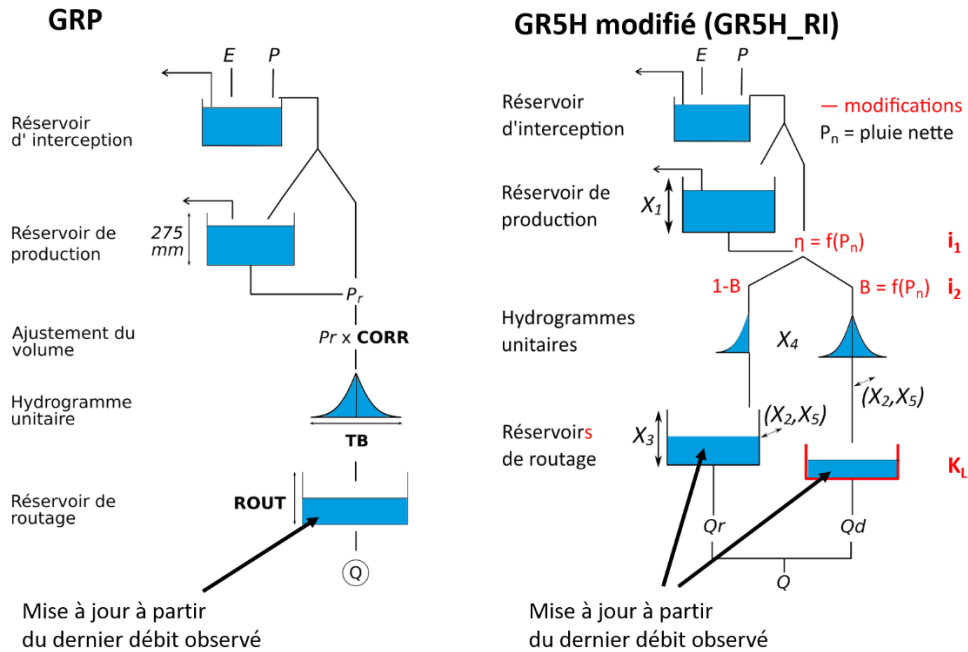


Figure 10 : Schéma du modèle GRP et du modèle GR5H intégrant les fonctions d'intensité de la pluie (GR5H_RI). CORR, TB et ROUT sont les paramètres libres du modèle GRP. X_1 , X_2 , X_3 , X_4 et X_5 sont les paramètres libres du modèle GR5H. i_1 , i_2 et K_L sont les paramètres ajoutés au modèle GR5H pour améliorer la prise en compte des intensités de pluie.

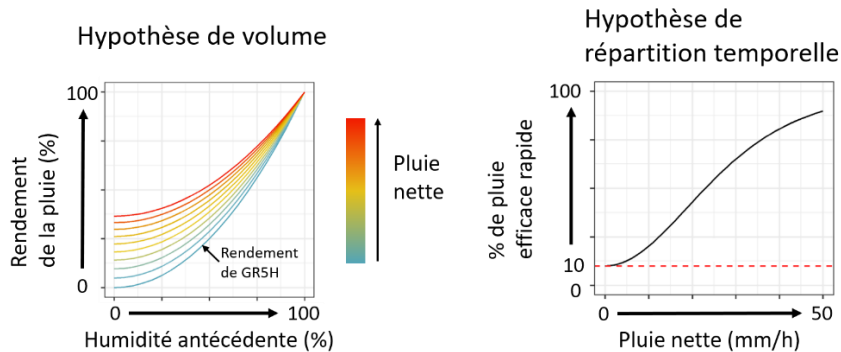


Figure 11: Schéma simplifié des fonctions d'intensité de la pluie proposées par Astagneau et al. (2022).

Calage, mise à jour et évaluation

Prévision hydrologique

Pour tester les modèles sur les séries passées, on se place successivement à chaque pas de temps de la série et on lance le modèle en prévision comme s'il était utilisé en temps réel. À chaque instant de prévision t , certains états des modèles sont mis à jour à partir du débit observé. Une fois les états initiaux mis à jour, les prévisions sont lancées entre $t + 1$ et $t + H$, H étant l'horizon (ou échéance) de prévision. C'est une manière de se replacer dans un contexte

de prévision proche du temps réel. Ainsi, on utilise toute l'information disponible jusqu'à l'instant de prévision pour émettre une prévision dans le futur. En temps réel, on utilise des prévisions de pluie entre $t + 1$ et $t + H$. Dans cette étude, nous utilisons les scénarios de pluies dites « parfaites », correspondant aux chroniques de pluie de bassin observées a posteriori. Cela nous permet de comparer les modèles de prévision indépendamment des incertitudes provenant des produits de pluie, ou du moins avec une incertitude moins importante qu'en temps réel.

Mise à jour des réservoirs

La mise à jour des conditions initiales du modèle GRP à partir du dernier débit observé s'effectue au niveau du réservoir de routage. À chaque instant de prévision, le niveau du réservoir de routage est ajusté de manière à reproduire exactement le dernier débit observé (méthode de mise à jour par insertion directe).

Le modèle GR5H_RI a deux branches de routage. Cela signifie que la mise à jour par insertion directe est nécessairement différente de la mise à jour de GRP. Lors de ses tests sur la structure du modèle GRP, Berthet (2010) a évalué une version à deux branches de routage (avec un unique réservoir de routage sur une des deux branches). Pour mettre à jour le réservoir de routage, il propose de trouver le niveau dont la vidange $Q_{R,t}^*$ est égale à $Q_{obs,t} - Q_{D,t}$, avec $Q_{obs,t}$ le débit observé à l'instant de prévision et $Q_{D,t}$ le flux provenant de la branche pseudo-directe. Cependant, cette règle implique que lorsque $Q_{D,t} \geq Q_{obs,t}$, le réservoir de routage se vide presque totalement pour s'ajuster au débit observé. Pour limiter cet effet, nous proposons de déterminer une vidange cible $Q_{R,t}^*$ calculée comme suit :

$$Q_{R,t}^* = \frac{Q_{R,t}}{Q_{R,t} + Q_{D,t}} \times Q_{obs,t} = \alpha \times Q_{obs,t} \quad (1)$$

$Q_{R,t}$ est le débit simulé qui provient de la branche indirecte (avant mise à jour) ; α est la fraction du débit simulé qui provient de la branche indirecte à l'instant de prévision (avant mise à jour).

Comme le modèle GR5H_RI intègre un réservoir linéaire sur la branche pseudo-directe, on peut

aussi calculer une vidange cible $Q_{D,t}^*$:

$$Q_{D,t}^* = (1 - \alpha) \times Q_{obs,t} \quad (2)$$

L'hypothèse que nous faisons ici est que l'information portée par l'erreur du modèle à un instant t ne permet pas d'estimer un partage « observé » des écoulements. On préfère donc reprendre le partage initialement simulé par le modèle.

La formulation de la vidange du réservoir de routage de GR5H (fonction instantanée en puissance 5 du niveau) n'est pas inversible analytiquement. Il n'y a donc pas de solution analytique donnant le niveau du réservoir dont la vidange est égale à $Q_{R,t}^*$. Pour trouver un niveau approché à chaque instant t , 1 000 valeurs entre $X3/1000$ et $X3$ sont testées, $X3$ étant la capacité du réservoir de routage (voir Pelletier (2021) pour une procédure similaire appliquée au modèle GR6J).

Le réservoir linéaire de la branche pseudo-directe de GR5H_RI est, lui, inversible. Le niveau du réservoir linéaire mis à jour L_t^* à l'instant t est calculé comme suit :

$$L_t^* = Q_{D,t}^* \times \frac{1 - K_L}{K_L} \quad (3)$$

où K_L [-] est le coefficient de vidange du réservoir linéaire.

Calage des modèles

Les paramètres des modèles sont estimés à partir d'une procédure de calage effectuée par bassin et sur deux sous-périodes indépendantes (P1 : 01/01/2000 – 30/06/2009 ; P2 : 01/07/2009 – 31/12/2018). Nous souhaitons analyser les performances des modèles indépendamment des compensations paramétriques induites par un calage des modèles avec les procédures de mise à jour activées. Le calage des deux modèles est donc effectué en simulation. Cela signifie que nous prenons les paramètres calés sur chaque bassin et chaque sous-période indépendamment des procédures de mise à jour des états initiaux. Une période de 2 ans précédant le début de chaque sous-période est appliquée pour initialiser les états des modèles (les critères de performance ne sont pas calculés sur ces périodes). L'algorithme de calage utilisé est basé sur l'algorithme EGD (*exhaustive gridding discretization*) de Perrin *et al.* (2008). Cet algorithme est implémenté dans le package airGR (Coron *et al.*, 2017, 2020). Les deux modèles ont été calés en utilisant le critère NSE (Nash et Sutcliffe, 1970) comme fonction objectif.

Evaluation de la qualité des prévisions

Les prévisions sont évaluées à horizon fixe. En d'autres termes, toutes les prévisions réalisées successivement sur chaque pas de temps de la série de données pour un horizon donné sont mises à la suite pour créer une série de débits prévus à cet horizon. Cette série temporelle est ensuite comparée aux observations selon le critère choisi. Pour cette étude, nous utilisons la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée sur les montées de crue. Les valeurs de RMSE sont rapportées au module du bassin versant, ce qui permet d'obtenir un critère adimensionnel comparable entre bassins. Pour calculer ce critère, les prévisions à horizon fixe retenues sont celles qui tombent dans la fenêtre de la montée de l'événement observé (du début de l'événement au pic observé). Afin de simplifier la présentation des résultats, les valeurs de RMSE sont présentées en évaluation croisée (i.e. sur P1 avec les paramètres estimés sur P2 et vice versa) sans distinguer les sous-périodes temporelles. Les résultats sont présentés pour les horizons de 3, 6, 12 et 24 h. Dans un premier temps, les 10 652 événements sont divisés en deux catégories : les événements dont le débit de pointe a lieu entre novembre et avril (hiver) et les événements dont le débit de pointe a lieu entre mai et octobre (été). Dans un deuxième temps, les événements sont catégorisés en fonction des temps de montée au pic observé.

Résultats

Nous nous intéressons tout d'abord à la performance des prévisions selon la saison d'occurrence du pic de crue. La figure 4 présente la distribution de la racine des erreurs quadratiques moyennes (RMSE, valeur optimale = 0) sur les montées de crue pour les deux

modèles. Les distributions de RMSE présentent des valeurs plus faibles pour le modèle GR5H_RI que pour le modèle GRP, cela pour tous les horizons de prévision et pour les deux saisons. Les différences de performance les plus importantes sont observées pour les événements d'été. En hiver et pour l'horizon 3 h, les différences de performance sont moins marquées.

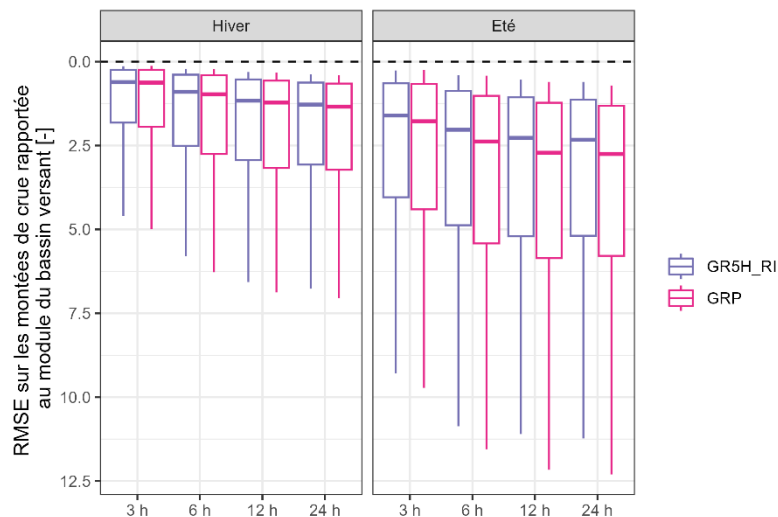


Figure 12 : Distribution des performances (validation croisée ; une valeur de critère par événement) des modèles GRP et GR5H_RI sur les montées de crue pour quatre échéances de prévision. 8 290 événements d'hiver et 2 362 événements d'été sont considérés ici. Les boîtes à moustaches sont tracées du quantile 5 % au quantile 95 %.

En comparant les performances sur les montées de crue aux temps de montée (fig. 5), on observe que plus le temps de montée est court, meilleures sont les performances de GR5H_RI par rapport à GRP, cela pour tous les horizons de prévision. Ces différences augmentent lorsque l'horizon se réduit. Entre 65 % et 70 % des événements dont le temps de montée est inférieur à 12 h sont mieux prévus par GR5H_RI que par GRP aux horizons 3 h et 6 h. Le quantile 50 % du ratio des performances est égal à 1 voire supérieur à 1 pour les événements dont le temps de montée est supérieur à 24 h pour les horizons 6, 12 et 24 h. À 3 h, 53 % de ces bassins sont mieux prévus par GRP. Ces résultats indiquent que la dynamique des crues a un fort impact sur les différences de performance entre GR5H_RI et GRP, même à très courte échéance. L'erreur à l'instant de prévision contient moins d'information lorsque de fortes variations du débit ont lieu en très peu de temps. Dans ce cas, seule une amélioration de la structure du modèle permet d'améliorer les prévisions.

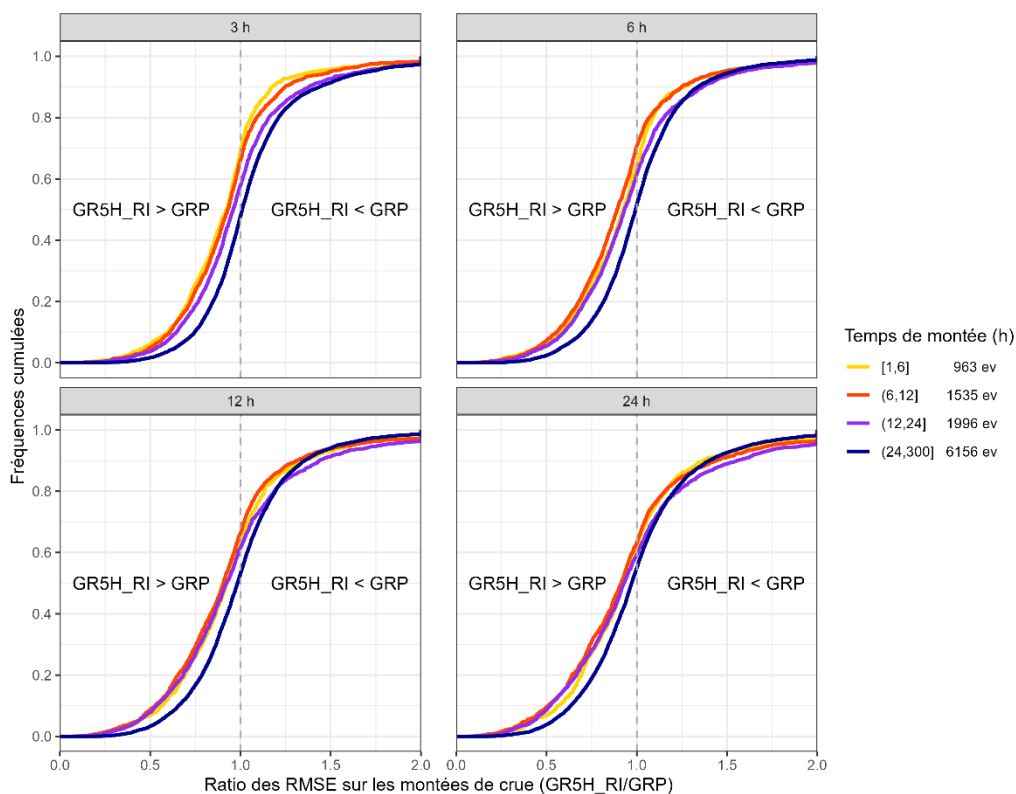


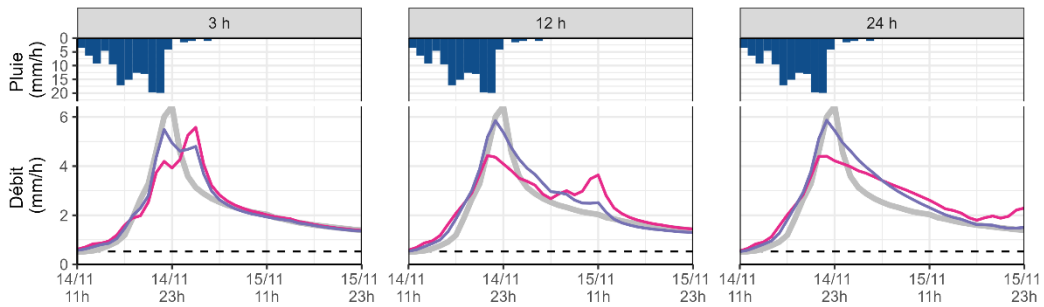
Figure 13 : Distribution du ratio des RMSE sur les montées de crue entre GR5H_RI et GRP en fonction du temps de montée des événements. Les résultats sont présentés en validation croisée pour quatre échéances de prévision. Le découpage des temps de montée a été choisi en fonction des échéances de prévision. Les boîtes à moustaches sont tracées du quantile 5 % au quantile 95 %. (« > » et « < » indiquent « meilleur que » et « moins bon que » respectivement)

La Figure 14 présente quatre hydrogrammes prévus par les modèles GRP et GR5H_RI aux horizons de 3, 12 et 24 h sur quatre bassins versants de notre base de données. Les hydrogrammes présentés ici ne sont que des illustrations des analyses précédentes et ne constituent pas un échantillon représentatif des résultats.

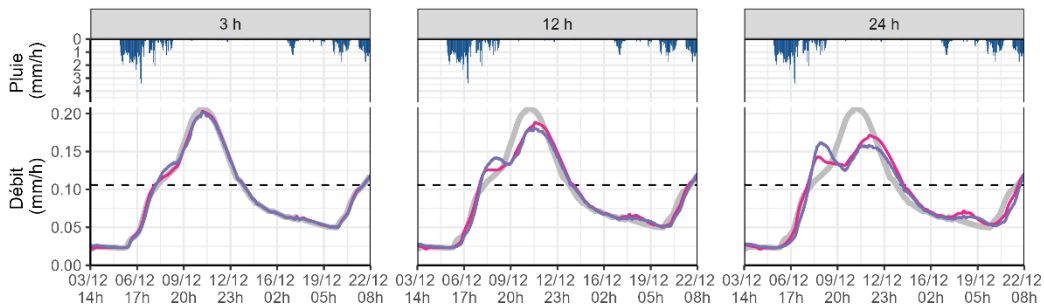
L'Ardèche à Ucel (478 km²) est un affluent en aval du Rhône en rive droite. De nombreux événements de crue ont lieu au début de l'automne sur ce bassin. L'événement qui a eu lieu en novembre 2014 est caractérisé par des intensités de pluie allant jusqu'à 20 mm/h. Le modèle GR5H_RI prévoit mieux le pic de crue que GRP pour les trois horizons de prévision. À 3 h, le pic prévu par GRP à échéance fixe est décalé de 3 h, ce qui signifie qu'il a été prévu à l'instant du pic observé. Bien que ce pic soit du même ordre de grandeur que le pic prévu par GR5H_RI, la prévision est de moins bonne qualité au regard de l'horizon considéré.

L'Ill à Osthouse (3 296 km²) est un affluent du Rhin en rive gauche. Il est caractérisé par une dynamique lente et des périodes de hautes eaux qui ont majoritairement lieu en hiver. La crue de décembre 2010 est un exemple caractéristique de ce bassin. L'événement de pluie associé à cet événement est réparti sur cinq jours. Les prévisions des deux modèles sont satisfaisantes pour les trois horizons mais le pic de crue est sous-estimé à 12 et 24 h. Le modèle GR5H_RI surestime une partie de la montée de crue et sous-estime plus fortement le pic que GRP.

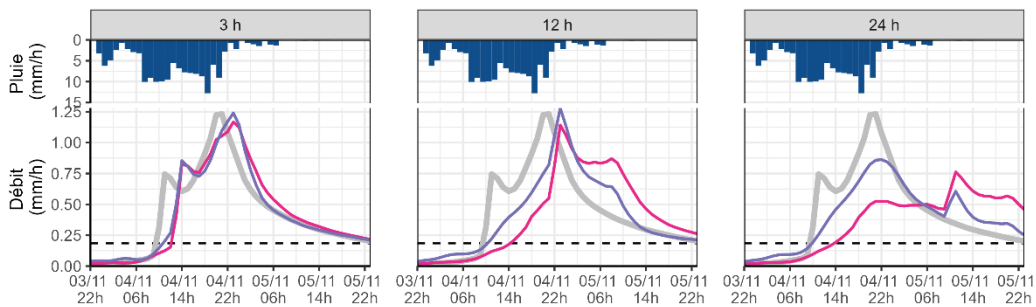
L'Ardèche à Ucel (2014)



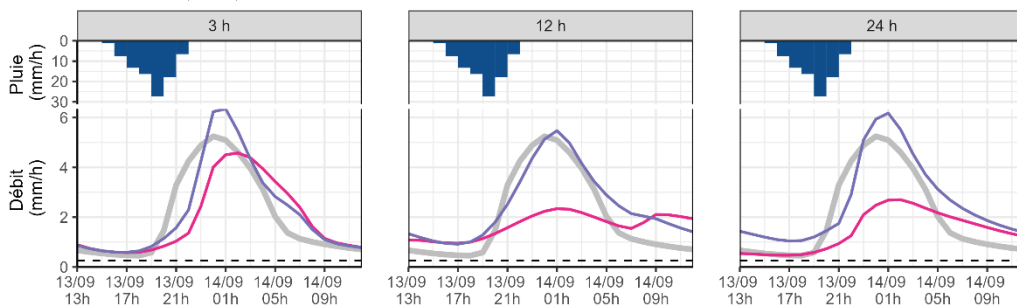
L'Ill à Osthouse (2010)



L'Estéron au Broc [La Clave] (2014)



La Cèze à Tharaux (2015)



— GRP — GR5H_RI — Obs

Figure 14 : Exemples d'hydrogrammes de crue (à horizon fixe) prévus par le modèle GRP et la version modifiée prenant en compte l'intensité (GR5H_RI) sur quatre bassins versants pour trois échéances de prévision (validation). La ligne en pointillés noirs est le quantile 95 % des débits sur la série complète.

L'Estéron au Broc (443 km²) est un bassin côtier méditerranéen dont les hautes eaux ont lieu en hiver et au début de l'automne. On observe que les deux modèles sous-estiment le volume et le pic d'une crue qui a eu lieu en novembre 2014, en particulier à 12 et 24 h. Le modèle GR5H_RI prévoit mieux le pic et la montée de crue que GRP pour ces horizons. La différence

est plus marquée à 24 h. À 3 h, les prévisions des deux modèles sont proches mais le pic et la montée de crue sont un peu mieux simulés par GR5H_RI.

La Cèze à Tharoux (665 km²) est un affluent en aval du Rhône en rive droite. Les périodes de hautes eaux ont lieu en automne sur ce bassin. La crue de septembre 2015 est caractérisée par des intensités de pluie allant jusqu'à 28 mm/h et une montée de crue d'une durée de 5 h. GR5H_RI prévoit mieux la montée, le volume et le pic de crue que GRP pour les trois horizons. Pour cet événement, la sous-estimation importante du volume de crue par GRP n'est pas rattrapée par son assimilation de données, même à courte échéance.

Conclusions et perspectives

L'objectif de cette étude était de déterminer si l'amélioration de la structure d'un modèle hydrologique pouvait conduire à une amélioration de la qualité des prévisions déterministes, en particulier lors de réactions rapides des bassins versants à de fortes intensités de pluie. Pour répondre à cet objectif, nous avons comparé les prévisions du modèle GRP, utilisé par les services de prévision des crues en France depuis plusieurs années, avec les prévisions d'un modèle hydrologique développé pour simuler les crues résultant de fortes intensités de pluie. Afin de comparer équitablement les deux modèles, nous avons construit une méthode de mise à jour des états initiaux de GR5H_RI similaire à celle utilisée par GRP. Les deux modèles ont été utilisés pour émettre des prévisions jusqu'à l'échéance 24 h sur 229 bassins versants sur lesquels 10 652 événements de crue ont été sélectionnés. Les prévisions ont été évaluées à partir d'un critère d'erreur sur les montées de crue. Les performances ont été comparées à la saison d'occurrence du pic de crue et aux temps de montée des événements.

Les résultats ont montré que le modèle GR5H_RI, couplé à une méthode de mise à jour de ces deux réservoirs de routage, a des performances plus élevées que le modèle GRP sur les montées de crue pour les quatre horizons de prévision évalués. Les prévisions des événements de crue qui ont lieu en été et au début de l'automne sont particulièrement améliorées. Les différences de performance entre les deux modèles sont très dépendantes au temps de montée des événements, même à courte échéance. Les événements associés à des dynamiques plus lentes des bassins sont prévus de manière équivalente par les deux modèles, sauf à 3 h où GRP a des performances plus élevées. Ces résultats indiquent que le choix d'une structure dans laquelle l'assimilation du dernier débit observé a un poids très important sur la qualité des prévisions n'est pas adapté lorsque des variations importantes du débit ont lieu en très peu de temps.

La nouvelle version du modèle de prévision proposée à l'issue de ce travail devrait en augmenter l'efficacité globale en conditions opérationnelles, et élargir son applicabilité à des types d'évènements et des contextes hydroclimatiques variés. Les améliorations proposées donnent toutefois lieu à une complexification de l'estimation des paramètres et de la méthode d'assimilation.

Les conclusions de ces travaux sont dépendantes de la méthode de mise à jour que nous avons employée ainsi que de la manière dont nous avons paramétré les modèles. Le choix d'estimer les paramètres des modèles en simulation pourrait notamment avoir une influence sur les performances à très courte échéance. Plus généralement, les résultats présentés dans ce travail impliquent de réfléchir à nouveau aux compromis entre la complexification de la structure, les gains de performance et l'incertitude paramétrique. Pour que la nouvelle version

du modèle de prévision soit intégrée dans les futurs développements opérationnels de GRP, il faudra déterminer si l'amélioration des prévisions déterministes pour une partie des événements liés à des dynamiques rapides des bassins versants justifie une complexification de la structure, de l'estimation des paramètres et de la mise à jour. Des travaux sont en cours pour trouver une méthode d'estimation des paramètres plus adaptée aux fonctions d'intensité de GR5H_RI.

Conclusion générale

Les travaux d'amélioration de chaînes de prévision pour des bassins présentant des événements de pluie intenses ont pu être menés et ont exploré diverses approches d'amélioration :

- amélioration des techniques d'assimilation de données, avec le test d'approches de filtrage (filtre de Kalman d'ensemble et filtre particulière) permettant notamment de prendre explicitement en compte diverses sources d'incertitudes ;
- raffinement de la résolution spatiale du modèle hydrologique par une approche semi-distribuée, permettant de prendre explicitement en compte l'information issue de stations de jaugeage situées au sein du bassin versant ;
- prise en compte des intensités de pluie au sein d'un modèle hydrologique de prévision, de manière à améliorer la prévision pour des événements présentant des réactions rapides fortement contrôlées par ces intensités.

Ces travaux, menés sur de larges échantillons de bassins versants de manière à obtenir des conclusions générales, convergent vers la nécessité de regarder le modèle de prévision globalement, en prenant en compte de manière conjointe les différents aspects testés ici, à savoir l'assimilation de données, la distribution spatiale et la structure de modèle. En effet, ces composantes de modélisation interagissent et leur importance relative est dépendante des sources d'incertitudes présentes et des échéances considérées. En absence d'information quantifiable sur ces sources d'incertitudes, les travaux montrent que des schémas de modélisation relativement simples peuvent permettre d'obtenir des résultats robustes.

L'information sur des points intérieurs, comme cela a pu être fait dans l'instrumentation de la ravine Saint-Gilles à la Réunion dans le cadre du projet, peut être source d'information dans la prévision à des échéances courtes (correspondant au temps de propagation), mais la prévision sera très largement dépendante de la modélisation de ces points amont pour des échéances plus lointaines, elle-même dépendant fortement de la qualité des prévisions de pluie. L'amélioration des performances des modèles de prévision passe donc par une amélioration des différentes composantes de la chaîne. L'objectif final est bien la production d'une alerte effective et exploitable pour la protection des biens et des personnes. La quantification des incertitudes au sein de ces chaînes de prévision devrait aider à l'évaluation du niveau de risque des différentes situations rencontrées et donc à la prise de décision.

Références

- Abbaszadeh, P., Moradkhani, H. et Yan, H. : Enhancing hydrologic data assimilation by evolutionary particle filter and Markov chain Monte Carlo. *Advances in Water Resources*, 111, 192–204, 2018.
- Addor, N., Do, H. X., Alvarez-Garreton, C., Coxon, G., Fowler, K., et Mendoza, P. A. : Large-sample hydrology: recent progress, guidelines for new datasets and grand challenges. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 712-725, 2020.
- Andréassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., Oudin, L., Mathevet, T., Ramos, M.-H., Valéry, A. : HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1757-1764, 2009.
- Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., & Clapp, T. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2), 174–188. <https://doi.org/10.1109/78.978374>
- Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., et Perrin, C. : When does a parsimonious model fail to simulate floods? Learning from the seasonality of model bias. *Hydrological Sciences Journal*, 66(8), 1288-1305, 2021.
- Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., Perrin, C. (2022). Catchment response to intense rainfall: evaluating modeling hypotheses, 36, e14676, *Hydrological Processes*, <https://doi.org/10.1002/hyp.14676>.
- Astagneau, P., Bourgin, F., Andréassian, V., Perrin, C., 2023. Impact hydrologique de fortes intensités de pluie : application à la prévision des crues. Colloque SHF “Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives”, Toulouse, 28-30 novembre 2023.
- Astagneau, P. : Pistes d’amélioration de la généralité et de l’efficacité d’un modèle opérationnel de prévision des crues. Thèse de doctorat, INRAE (Antony), Sorbonne Université (Paris), GRNE (Paris), 212 pp, 2022.
- Berthet, L. : Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 2010.
- Berthet, L., Bourgin, F., Perrin, C., Viatgé, J., Marty, R. & Piote, O. (2020). A crash testing framework for predictive uncertainty assessment when forecasting high flows in an extrapolation context. *Hydrology and Earth System Sciences* 24, 2017–2041, <https://doi.org/10.5194/hess-24-2017-2020>.
- Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., et al. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141–1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>
- Bourgin, F. : Comment quantifier l’incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 230 pp, 2014.
- Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M. & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water* 8, <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C. & Andréassian, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software* 94, 166–171, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>.
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C. & Michel, C. (2020). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.6.9.27. <https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/index.html>.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., & Bourgin, P. Y. (2020). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group, Antony. Retrieved from <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>

- Dufeu, E., Mougin, F., Foray, A., Baillon, M., Lamblin, R., Hebrard, F., Chaleon, C., Romon, S., Cobos, L., Gouin, P., Audouy, J. N., Martin, R., t Poligot-Pitsch, S. : Finalisation de l'opération HYDRO 3 de modernisation du système d'information national des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, 2099317, 2022.
- de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H. et Perrin, C. : A regularization approach to improve the sequential calibration of a semidistributed hydrological model. *Water Resources Research*, 55(11), 8821–8839, 2019.
- Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C5), 10143–10162. <https://doi.org/10.1029/94JC00572>
- Ficchi, A., Perrin, C., & Andréassian, V. (2016). Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: An analysis based on 2400 flood events. *Journal of Hydrology*, 538, 454–470. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.016>
- Ficchi, A., Perrin, C. & Andréassian, V. (2019). Hydrological modelling at multiple sub-daily time steps: Model improvement via flux-matching. *Journal of Hydrology* 575, 1308–1327, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.084>.
- Gérard, L. (2010). Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage. Rapport de stage, Cemagref Antony, INP Toulouse, <https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2012/07/2010-MASTER-GERARD.pdf>
- Hapuarachchi, H.A.P., Wang, Q.J. & Pagano, T.C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes* 25, 2771–2784, <https://doi.org/10.1002/hyp.8040>.
- Jain, S.K., Mani, P., Jain, S.K., Prakash, P., Singh, V.P., Tullós, D., Kumar, S., Agarwal, S.P. & Dimri, A.P. (2018). A brief review of flood forecasting techniques and their applications. *International Journal of River Basin Management* 16, 329–344, <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1411920>.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1), 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- Le Moine, N. (2008). Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Thèse de doctorat, UPMC, Cemagref, <https://hal.inrae.fr/tel-02591478>.
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., et al. (2014). Re-founding the national information system designed to manage and give access to hydrometric data. *La Houille Blanche*, 1, 25–32. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>
- Lerat, J. : Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 300 pp, 2009.
- Lerat, J., Andréassian, V., Perrin, C., Vaze, J., Perraud, J. M., Ribstein, P., et Loumagne, C. : Do internal flow measurements improve the calibration of rainfall-runoff models?. *Water Resources Research*, 48(2), 2012.
- Liu, Y., Weerts, A., Clark, M., Hendricks Franssen, H. J., Kumar, S., Moradkhani, H., et al. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: Progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3863–3887. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3863-2012>
- Lobligeois, F. : Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 2014.
- Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V., et Perrin, C. : A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS Publication*, 307, 211, 2006.
- McMillan, H., Booker, D. & Cattoën, C. (2016). Validation of a national hydrological model. *Journal of Hydrology* 541, 800–815, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.043>.

- Melsen, L.A., Addor, N., Mizukami, N., Newman, A.J., Torfs, P.J.J.F., Clark, M.P., Uijlenhoet, R. & Teuling, A.J. (2018). Mapping (dis)agreement in hydrologic projections. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 1775–1791, <https://doi.org/10.5194/hess-22-1775-2018>.
- Munier, S. : Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé. Thèse de doctorat, Cemagref (Montpellier), AgroParisTech (Montpellier), 2009.
- Nash, J. E., et Sutcliffe, J. V. : River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290, 1970.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., et Loumagne, C. : Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4), 290-306, 2005.
- Pagano, T.C., Wood, A.W., Ramos, M.H., Cloke, H.L., Pappenberger, F., Clark, M.P., Cranston, M., Kavetski, D., Mathevet, T., Sorooshian, S. & Verkade, J.S. (2014). Challenges of Operational River Forecasting. *Journal of Hydrometeorology* 15, 1692–1707, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0188.1>.
- Pappenberger, F., Pagano, T.C., Brown, J.D., Alfieri, L. & Lavers, D. A., et al. (2016). Hydrological Ensemble Prediction Systems Around the Globe. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting* (eds. Q. Duan, F. Pappenberger, J. Thielen, A. Wood, H.L. Cloke & J.C. Schaake), p. 1–35, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_47-1.
- Pechlivanidis, I. G., McIntyre, N. R., et Wheeler, H. S. : Calibration of the semi-distributed PDM rainfall–runoff model in the Upper Lee catchment, UK. *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 198-209, 2010.
- Pelletier, A. (2021). Nappes et rivières : la piézométrie peut-elle améliorer la prévision des étiages des cours d'eau ? Thèse de doctorat, INRAE Antony, Ecole des Ponts, Sorbonne Université, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03783485>.
- Peredo, D. : Quels gains d'une modélisation hydrologique adaptée et d'une approche d'ensemble pour la prévision des crues rapides ? Thèse de doctorat, INRAE (Antony), Sorbonne Université (Paris), GRNE (Paris), 269 pp, 2021.
- Peredo, D., Ramos, M.H., Andréassian, V. & Oudin, L. (2022). Investigating hydrological model versatility to simulate extreme flood events. *Hydrological Sciences Journal* <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2030864>.
- Perrin, C., Andréassian, V., Serna, C.R., Mathevet, T. & Le Moine, N. (2008). Discrete parameterization of hydrological models: Evaluating the use of parameter sets libraries over 900 catchments. *Water Resources Research* 44, W08447, <https://doi.org/10.1029/2007WR006579>.
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, 275 – 289, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).
- Piazzì, G. (2019). Comparaison de plusieurs approches d'assimilation de données pour la prévision des crues. Rapport d'études. Convention SNRH-Irstea. Action PREVI - A2, Evaluation de diverses approches de semi-distribution pour la prévision. UR HYCAR, 12 p.
- Piazzì, G., Thirel, G., Perrin, C., Delaigue, O., 2021. Sequential data assimilation for streamflow forecasting: Assessing the sensitivity to uncertainties and updated variables of a conceptual hydrological model at basin scale. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028390. <https://doi.org/10.1029/2020WR028390>.
- Royer-Gaspard, P., 2021. Revue de bibliographie et mise en œuvre du modèle GRSD en prévision globale. Rapport d'études. Convention SNRH-INRAE. Action PREVI A2, Approches de semi-distribution pour la prévision. UR HYCAR, 48 p.
- Royer-Gaspard, P., Bourgin, Perrin, C., Andréassian, V., de Lavenne, A., Thirel, G., Tilmant, F., 2023. Assimilation d'observations de débit dans un modèle semi-distribué simple de prévision des crues :

- jusqu'où les observations amont peuvent-elles améliorer les prévisions aval ? Colloque SHF "Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives", Toulouse, 28-30 novembre 2023.
- Salamon, P., & Feyen, L. (2009). Assessing parameter, precipitation, and predictive uncertainty in a distributed hydrological model using sequential data assimilation with the particle filter. *Journal of Hydrology*, 376(3-4), 428–442. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.051>
- Saulnier, G. M., et Le Lay, M. : Sensitivity of flash-flood simulations on the volume, the intensity, and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France). *Water Resources Research*, 45(10), 2009.
- Sauquet, E., Gottschalk, L. & Krasovskaia, I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research* 39, 403–423, <https://doi.org/10.2166/nh.2008.331>.
- Schaake, J., Hamill, T. M., Buizza, R., & Clark, M. (2007). HEPEx: the hydrological ensemble prediction experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(10), 1541–1548. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-10-1541>
- Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C. et Soubeyroux, J.-M. : A 10-year (1997–2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over france: methodology and first results. IAHS-AISH Publication, 351, 255–260, 2012.
- Tangara, M. (2005). Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, Ecole pratique des hautes études, Paris, <https://webgr.inrae.fr/publications/theses>.
- Thébault, C., Perrin, C., Andréassian, V., Thirel, G., Legrand, S., et Delaigue, O. (en discussion): Multi-model approach in a variable spatial framework for streamflow simulation. *EGU sphere*, 1-34, 2023.
- Troin, M., Arsenault, R., Wood, A.W., Brissette, F. & Martel, J.L. (2021). Generating ensemble streamflow forecasts: A review of methods and approaches over the past 40 years. *Water Resources Research* 57, e2020WR028392, <https://doi.org/10.1029/2020wr028392>.
- Viatgé, J., Pinna, T., Ficchi, A., Perrin, C., Dorchies, D., Garandeau, L. & Tilmant, F. (2019). Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. *La Houille Blanche* p. 72–80, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>.
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J. M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003.10.1002/joc.2003>
- Weerts, A. H., & El Serafy, G. Y. (2006). Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 42(9), W09403. <https://doi.org/10.1029/2005WR004093>.
- Wood, A. W., Hopson, T., Newman, A., Brekke, L., Arnold, J., & Clark, M. (2016). Quantifying streamflow forecast skill elasticity to initial condition and climate prediction skill. *Journal of Hydrometeorology*, 17(2), 651–668. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0213.1>
- Wu, W., Emerton, R., Duan, Q., Wood, A.W., Wetterhall, F. & Robertson, D.E. (2020). Ensemble flood forecasting: Current status and future opportunities. *WIREs Water* 7, <https://doi.org/10.1002/wat2.1432>.
- Zanchetta, A. & Coulibaly, P. (2020). Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. *Water* 12, 570, <https://doi.org/10.3390/w12020570>.