

AMÉLIORATION DE LA STRUCTURE D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE POUR PRÉVOIR LA RÉACTION DES BASSINS VERSANTS SOUMIS À DE FORTES INTENSITÉS DE PLUIE

*Improving the structure of a hydrological model to forecast catchment response
to intense rainfall*

Auteurs : ASTAGNEAU Paul^{1*}, BOURGIN François¹, ANDRÉASSIAN Vazken¹, PERRIN Charles¹

* *auteur correspondant*

¹Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1, rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex (paulastagneau123@yahoo.fr)

Choix du thème/session :

1/ ~~Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations

Résumé : Nous présentons une évaluation comparée des prévisions de crue d'un modèle utilisé par les services opérationnels en France (GRP) et des prévisions d'un modèle développé pour améliorer la simulation des crues résultant de fortes intensités de pluie (GR5H_RI), réalisée sur un large échantillon de 229 bassins versants français répartis sur le territoire métropolitain. 10 652 événements ont été sélectionnés, avec 19 ans de données au pas de temps horaire, pour effectuer cette évaluation. Les modèles sont couplés à une méthode de mise à jour des états initiaux pour effectuer des prévisions aux horizons 3, 6, 12 et 24 h. Les résultats indiquent que le modèle GR5H_RI a en moyenne de meilleures performances que le modèle GRP aux quatre horizons, en particulier pour prévoir les crues dont les temps de montée sont inférieurs à 12 h et qui ont majoritairement lieu en été et au début de l'automne. L'exploitation du dernier débit observé ne permet pas de rattraper les erreurs structurelles du modèle GRP lors de réactions rapides des bassins versants à de fortes intensités de pluie. La nouvelle structure offre ainsi des perspectives opérationnelles intéressantes.

Mots clefs : prévision ; modélisation hydrologique ; intensités de pluie

Abstract: We compared the flood forecasts issued by a model used by operational services in France (GRP) and by a model developed to improve the simulation of floods resulting from intense rainfall (GR5H_RI). 10,652 flood events were selected from 19 years of hourly data available for 229 French catchments. The models were combined with a state-updating procedure to produce forecasts at 3-, 6-, 12- and 24-h lead times. Results indicate that the GR5H_RI model performs better on average than the GRP model at all lead times, particularly for forecasting rapid floods (rise time < 12 h), which occur mainly in summer and early autumn. The use of the last observed streamflow to update initial conditions does not compensate for GRP's structural errors in the case of fast catchment response to intense rainfall. The new structure therefore opens valuable operational perspectives.

Keywords: forecasting; hydrological modelling; rainfall intensity

1. 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 effectuée 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 la complexification de trois éléments : la structure du modèle, l’estimation de ses paramètres et l’assimilation du dernier débit observé. Le compromis retenu consiste à mettre un poids très important sur le débit observé à l’instant de la 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 cette situation, l’assimilation de données ne suffit pas toujours à compenser les limites structurelles des modèles hydrologiques.

Nous cherchons donc à répondre à la question suivante : l’amélioration de la structure d’un modèle hydrologique conduit-elle 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 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.

2. DONNÉES ET MÉTHODES

2.1. 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.

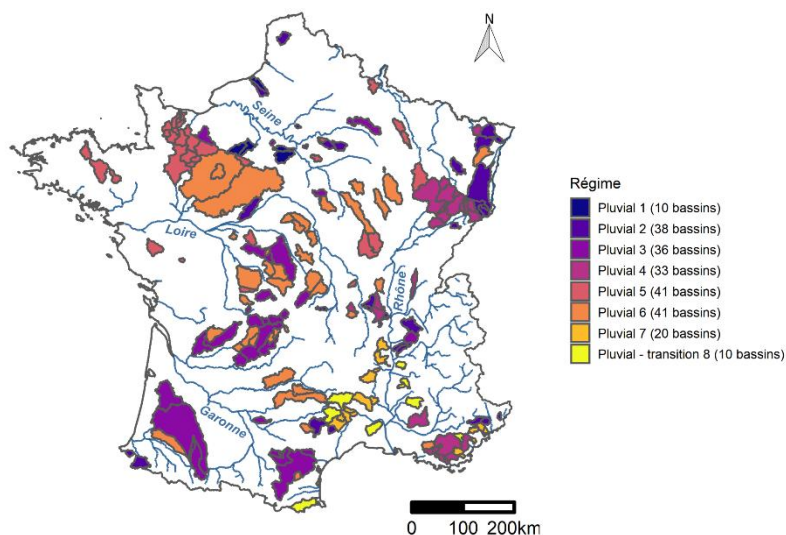


Figure 1 : Localisation des 229 bassins versants en France métropolitaine. Classification en régimes hydrologiques selon la définition de Sauquet et al. (2008).

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). La désagrégation temporelle des séries d’ETP

journalières a été effectuée une clé de répartition calculée par une fonction parabolique entre 6h et 19h. 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).

2.2. Modèles

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

- le modèle GRP 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).

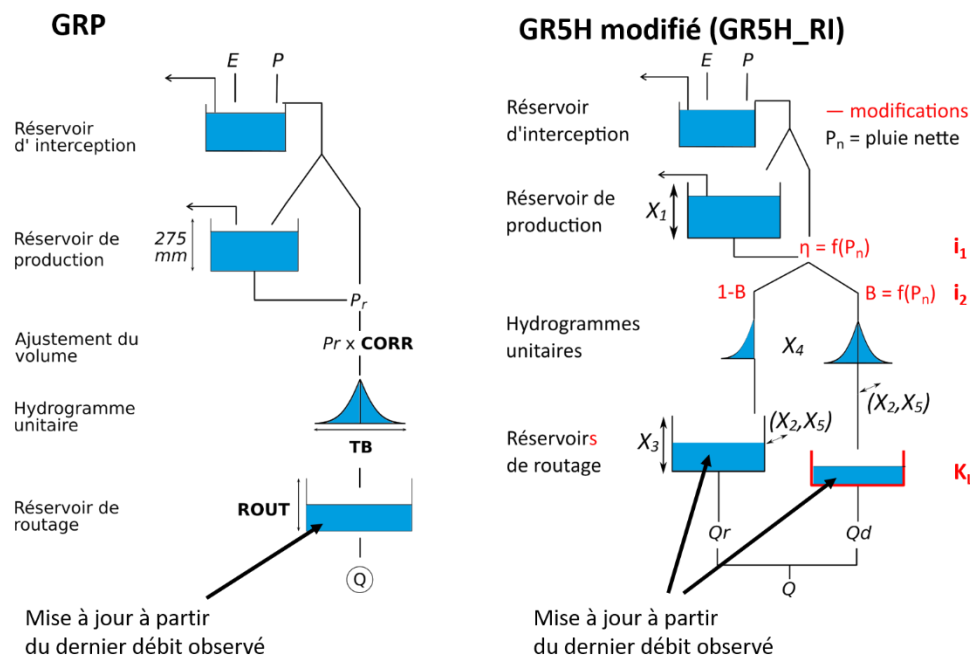


Figure 2 : Schéma du modèle GRP et du modèle GR5H intégrant les fonctions d'intensité de la pluie (GR5H_RI). CORR (coefficient de correction de la pluie efficace ; sans unité), TB (temps de base de l'hydrogramme unitaire ; h) et ROUT (capacité du réservoir de routage ; mm) sont les paramètres libres du modèle GRP. X_1 (capacité du réservoir de production ; mm), X_2 (coefficient d'échange ; mm/h), X_3 (capacité du réservoir de routage de la branche indirecte ; mm), X_4 (demi-temps de base des hydrogrammes unitaires ; h) et X_5 (seuil d'échange ; sans unité) sont les paramètres libres du modèle GR5H. i_1 (coefficient d'intensité de la pluie ; h/mm), i_2 (coefficient d'intensité de la pluie ; h/mm) et K_L (coefficient de vidange du réservoir linéaire de la branche directe ; sans unité) sont les paramètres libres ajoutés au modèle GR5H pour améliorer la prise en compte des intensités de pluie.

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.

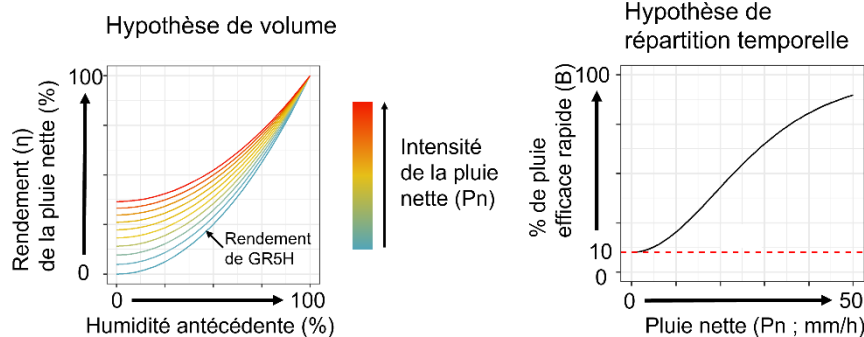


Figure 3: Schéma simplifié des fonctions d'intensité de la pluie proposées par Astagneau et al. (2022).

2.3. 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_0 , 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 $t_0 + 1$ et $t_0 + H$, 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 $t_0 + 1$ et $t_0 + H$. 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 prévisions de pluie, et donc 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 $Q_{R,t0}^*$ est égale à $Q_{obs,t0} - Q_{D,t0}$, avec $Q_{obs,t0}$ le débit observé à l’instant de prévision et $Q_{D,t0}$ le flux provenant de la branche pseudo-directe. Cependant, cette règle implique que lorsque $Q_{D,t0} \geq Q_{obs,t0}$, le réservoir de routage sur la branche indirecte se vide presque totalement pour s’ajuster au débit observé. Dans ce cas, la mise à jour ne permet pas de s’ajuster totalement au débit observé afin de ne pas obtenir des valeurs négatives de niveau de réservoir. Pour limiter cet effet, nous faisons l’hypothèse que l’information portée par l’erreur du modèle à un instant donné ne permet pas d’estimer un partage « observé » des écoulements. On préfère donc reprendre le partage initialement simulé par le modèle.

Nous proposons ainsi de déterminer une vidange cible $Q_{R,t0}^*$ calculée comme suit :

$$Q_{R,t0}^* = \frac{Q_{R,t0}}{Q_{R,t0} + Q_{D,t0}} \times Q_{obs,t0} = \alpha \times Q_{obs,t0} \quad \#(1)$$

$Q_{R,t0}$ 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 $Q_{D,t0}^*$:

$$Q_{D,t0}^* = (1 - \alpha) \times Q_{obs,t0} \quad \#(2)$$

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 $Q_{R,t0}^*$. Pour trouver un niveau approché à chaque instant t_0 , 1 000 valeurs entre $X3/1000$ et $X3$ sont testées, $X3$ étant la capacité du réservoir de routage en mm (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_{t0}^* à l’instant t_0 est calculé comme suit :

$$L_{t0}^* = Q_{D,t0}^* \times \frac{1 - K_L}{K_L} \quad \#(3)$$

où K_L [-] est le coefficient de vidange du réservoir linéaire. K_L prend des valeurs entre 0 et 1.

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). Le début de l’événement est défini comme l’instant à partir duquel le débit dépasse 20% du débit maximal de l’événement. 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.

3. 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.

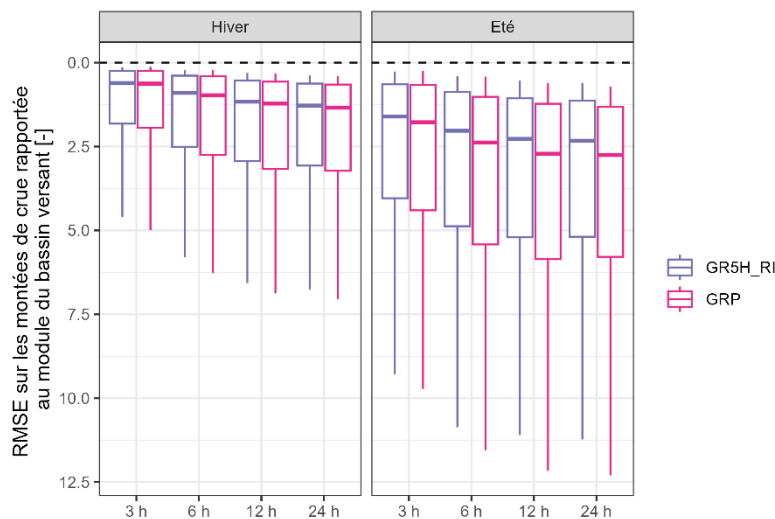


Figure 4 : Distribution des performances (validation croisée ; une valeur de critère par événement) des modèles GRP et GR5H_RI sur les montées de crue pour quatre échéances de prévision. 8 290 événements d’hiver et 2 362 événements d’été sont considérés ici. Les boîtes à moustaches sont tracées du quantile 5 % au quantile 95 %.

En comparant les performances sur les montées de crue en fonction du temps de montée observé (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. En d’autres termes, les différences de performances les plus importantes sont observées pour les temps de montée inférieurs à 12h et pour les horizons courts. Le quantile 50 % du ratio des performances est égal à 1 voire inférieur à 1 pour les événements dont le temps de montée est supérieur à 24 h pour les horizons 6, 12 et 24 h, ce qui signifie que GR5H-RI a des performances légèrement plus élevées que GRP dans ces situations. À l’inverse, à l’horizon 3 h, 53 % de ces événements sont mieux prévus par GRP. Ces résultats indiquent que le temps de montée, et donc 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.

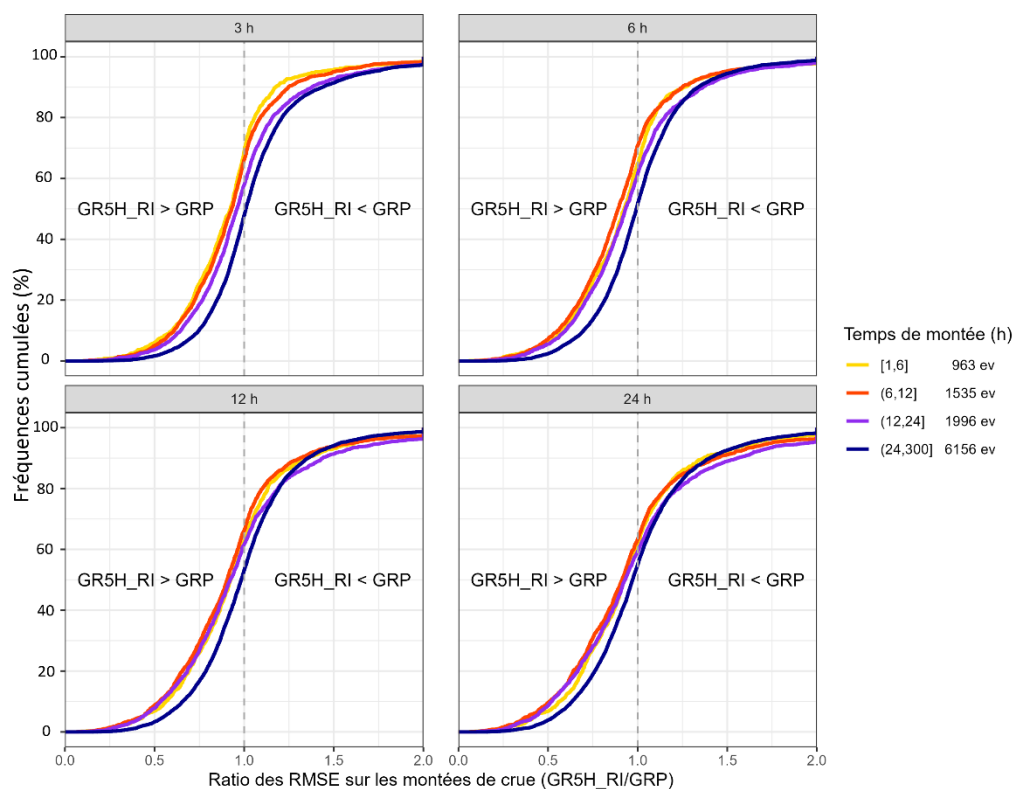


Figure 5 : Distributions cumulées du ratio des RMSE sur les montées de crue entre GR5H_RI et GRP en fonction du temps de montée des événements. Les résultats sont présentés en validation croisée pour quatre échéances de prévision. Le découpage des temps de montée en quatre groupes suit les valeurs des échéances de prévision (3h, 6h, 12h, 24h). « > » et « < » indiquent « meilleur que » et « moins bon que » respectivement

La figure 6 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 du Rhône en rive droite et en aval de Lyon. 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 l’horizon 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 car le pic de crue prévu par GRP est décalé par rapport aux pic observé, décalage du même ordre de grandeur que l’horizon de prévision considéré.

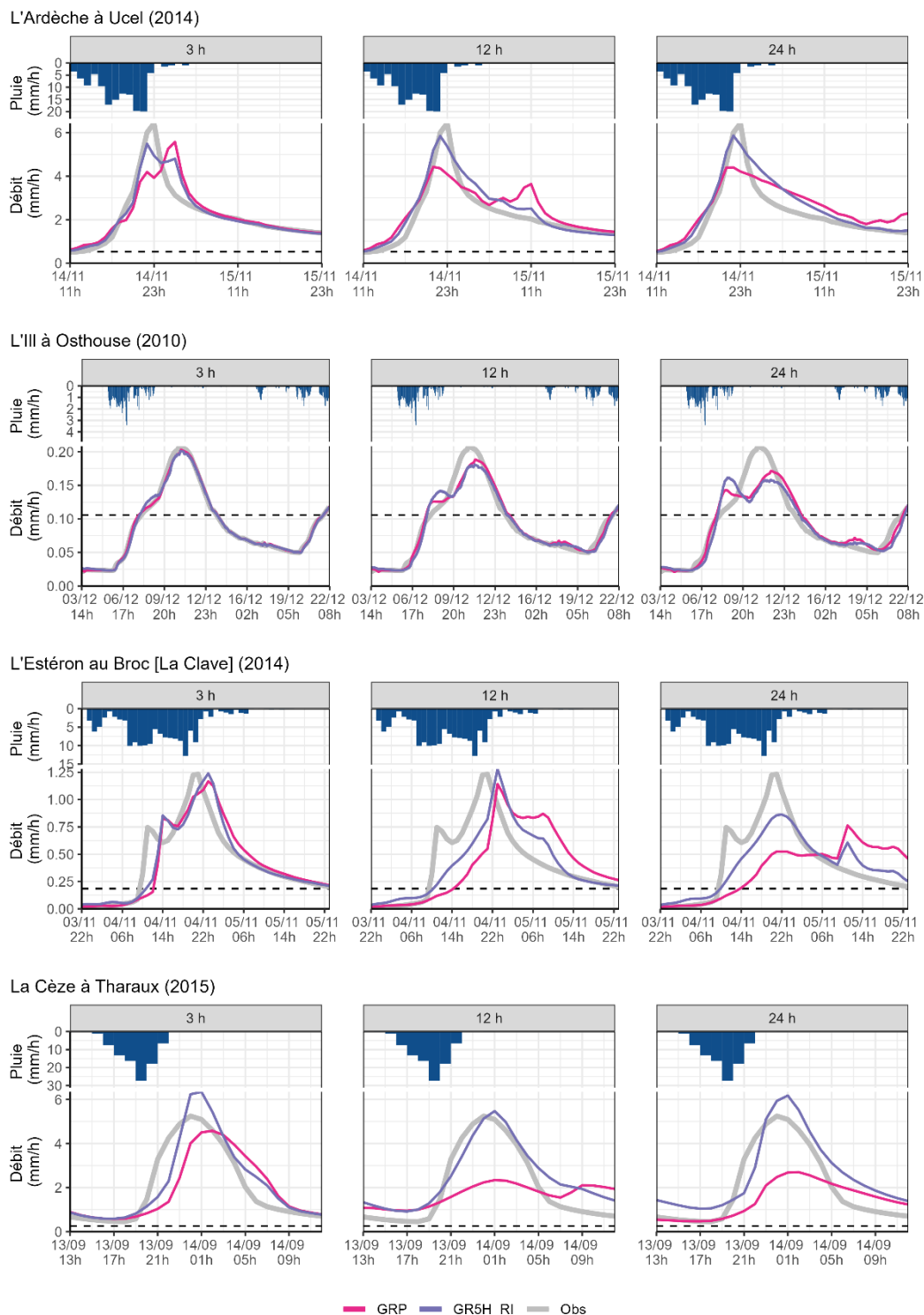


Figure 5 : Exemples d'hydrogrammes de crue (à horizon fixe) prévus par le modèle GRP et la version modifiée prenant en compte l'intensité (GR5H_RI) sur quatre bassins versants pour trois échéances de prévision (validation). La ligne en pointillés noirs est le quantile 95 % des débits sur la série complète.

L'Ill à Osthause (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'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 Tharaux (665 km²) est un affluent 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.

4. CONCLUSION 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 en fonction de la saison d'occurrence du pic de crue et des temps de montée des événements.

Les résultats ont montré que le modèle GR5H_RI, couplé à une méthode de mise à jour de ses deux réservoirs de routage, a des performances moyennes 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. 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 (GR5H_RI) devrait en augmenter l'efficacité globale en conditions opérationnelles, et élargir son applicabilité à des types d'événements 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.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le Ministère de de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (DGPR/SNRH/SCHAPI), qui a financé la bourse de doctorat du premier auteur. Les auteurs remercient Météo-France et la Banque HYDRO pour avoir fourni les données météorologiques et hydrologiques, respectivement. Nous remercions Jérémy Verrier pour son aide dans l'utilisation d'un cluster de calcul pour faire tourner les modèles.

6. REFERENCES

- Astagneau, P. C. (2022). *Pistes d’amélioration de la généralité et de l’efficacité d’un modèle opérationnel de prévision des crues*. Thèse de doctorat, Sorbonne Université, INRAE Antony, <https://theses.hal.science/tel-04028903>.
- Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., and Perrin, C. (2021). When does a parsimonious model fail to simulate floods? Learning from the seasonality of model bias, *Hydrological Sciences Journal*, **66**, 1288-1305, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1923720>.
- 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>.
- Berthet, L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique*. Thèse de doctorat, Agro-ParisTech, Paris, <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00529652>.
- Berthet, L., Bourgin, F., Perrin, C., Viatgé, J., Marty, R. & Piotte, O. (2020). A crash testing framework for predictive uncertainty assessment when forecasting high flows in an extrapolation context. *Hydrology and Earth System Sciences* **24**, 2017–2041, <https://doi.org/10.5194/hess-24-2017-2020>.
- 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., Dorchie, 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. (2020). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- 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>.
- 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., Tullos, 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>.
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M. & Ndimba, P.O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche* **100**, 25–32, <https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>.
- 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>.
- 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>.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005). 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**, 290–306, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- 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.

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. (2021). *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, <https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-03469456v1>.

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).

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>.

Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C. & Soubeyroux, J.M. (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results. *IAHS Publication* **351**, 255–260, http://hydrologie.org/redbooks/a351/abs_351_0255.pdf.

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>.

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., Dorchie, 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**, 1627–1644, <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.

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>.