

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 ?

Streamflow data assimilation in a simple semi-distributed flood forecasting model: benefits of upstream data for downstream forecasts

Auteurs : ROYER-GASPARD Paul^{1,2*}, BOURGIN François¹, PERRIN Charles¹, ANDRÉASSIAN Vazken¹, DE LAVENNE Alban¹, THIREL Guillaume¹, TILMANT François¹

* *auteur correspondant*

¹Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR, Antony, France, e-mail: francois.bourgin@inrae.fr

²Maintenant à : CNRS UMR7300 ESPACE, Université Côte d’Azur, Nice 06204, France, e-mail: paul.royer-gaspard@hydroclimat.com

Résumé : Le modèle hydrologique GRP, utilisé pour anticiper les crues en France, représente le bassin de manière globale, limitant ainsi l’exploitation des informations spatiales disponibles sur les événements. Ce travail présente les résultats de la discrétisation du modèle de prévision hydrologique horaire GRP sous forme semi-distribuée, appelée GRPS. L’objectif est de comprendre l’impact de l’assimilation des observations de débits aux stations amont pour la prévision des crues à l’aval. L’étude compare les performances des deux modèles sur un grand échantillon d’événements de crue dans des bassins versants emboîtés français. Les résultats montrent que GRPS surpasse en moyenne légèrement GRP jusqu’à l’échéance correspondant à l’arrivée à l’aval des dernières observations de débit amont, malgré une grande disparité d’un événement à l’autre. La classification des performances par type d’événement révèle l’existence d’interactions néfastes de la méthode d’assimilation de données et des erreurs dans les transferts hydrauliques des hydrogrammes de l’amont vers l’aval. Un test de sensibilité montre qu’il est possible de réduire le nombre d’événement où GRPS est peu performant aux premières échéances par l’amélioration du transfert et du schéma d’assimilation. Enfin, la qualité des prévisions amont est un facteur important de la qualité des prévisions à l’aval, une fois le bénéfice de l’assimilation passé. Cette étude confirme l’intérêt de l’assimilation de multiples observations de débit dans un modèle de prévision hydrologique semi-distribué et propose quelques pistes pour son amélioration.

Mots-clefs : prévision des crues, modélisation hydrologique, discrétisation spatiale, assimilation de données

Abstract: The GRP hourly hydrological forecasting model is used for operational flood forecasting in France. This work presents a semi-distributed version of GRP, called GRPS, to overcome some of the limits linked to the lumped approach adopted in the initial model, by questioning the impact of assimilating flow observations at upstream stations in a nested catchment for downstream flood forecasting. The study compares the performance of the two

models on a large sample of flood events in nested catchments in France. The results show that, on average, GRPS slightly outperforms GRP up to the lead time corresponding to the arrival downstream of the last upstream flow observations, despite a wide disparity across events. A classification of the events reveals the existence of detrimental interactions between the data assimilation method and errors in the hydraulic propagation model. A sensitivity test shows that it is possible to reduce the number of events where GRPS performs poorly at short lead times by improving both the propagation model and assimilation scheme. Our results also show that the quality of upstream forecasts influences the quality of downstream forecasts, once the benefits of assimilation are lost. This study confirms the value of assimilating multiple flow observations in a semi-distributed hydrological forecasting model and suggests several avenues for its further development.

Keywords: flood forecasting, hydrological model, spatial discretization, data assimilation

1 INTRODUCTION

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 (Berthet, 2010 ; Bourgin, 2014), et le modèle 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’avoir des performances souvent au moins aussi bonnes en simulation semi-distribuée qu’en simulation globale (e.g. de Lavenne et al., 2019). 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 ; Piazzzi 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 simple 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 ?

2 METHODOLOGIE

2.1 Description de la base de données

L’étude est menée sur un ensemble de 136 bassins versants emboîtés (comprenant un total de 285 stations de jaugeage) en France continentale au pas de temps horaire sur la période 1998-2018 (Figure 1). La base de données provient des travaux de Thébault et al. (2023), et a été construite pour réunir un échantillon suffisamment large pour obtenir des conclusions générales (Addor et al., 2020).

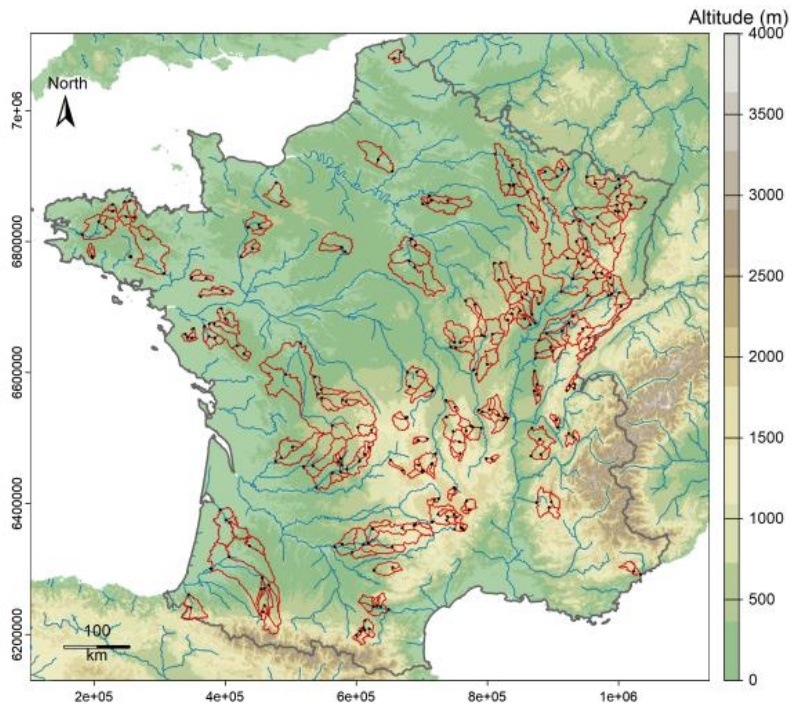


Figure 1. Carte de l’échantillon des bassins versants emboîtés (contours rouges) et des stations de jaugeage (points noirs).

Les séries temporelles sur le débit des cours d'eau proviennent de l'archive nationale Hydroportail (Dufeu et al., 2022, extraction le 28 octobre 2019), 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.

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.

2.2 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 Thébaud 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 (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des bassins versants de l'échantillon.

Caractéristiques	Minimum	Médiane	Maximum
Surface (km ²)	15	596	10087
Ratio des surfaces amont/aval (-)	0.05	0.42	0.86
Temps de concentration (heures)	13	30	112
Longueur hydraulique amont-aval (km)	0.2	26.1	125.1
Temps de propagation amont-aval (heures)	0	4	60

2.3 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

2.4 Modèles hydrologiques

Le modèle GRP (Berthet, 2010) est un modèle hydrologique horaire 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. Dans GRP, l'assimilation est effectuée avec une insertion directe du débit observé pour corriger analytiquement le niveau du réservoir.

Le modèle GRPS est une configuration semi-distribuée de 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 GRPS, l'assimilation des données de débit est effectuée pour corriger les états du modèle des sous-bassins versants à chaque station de jaugeage. La correction des états d'un sous-bassin versant ne dépend que du débit observé à la station de jaugeage et du débit simulé à cette station. De ce fait, aux stations situées à l'amont, la correction des états est identique à celle de GRP. Les débits prévus par GRPS à l'amont sont identiques à ceux de GRP à ces stations. Cependant, à l'exutoire principal, à l'aval, le débit simulé est la somme de la contribution du sous-bassin versant intermédiaire et des débits propagés depuis les stations amont. Afin de ne pas faire porter

toute l'erreur aux états du seul sous-bassin versant intermédiaire, 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 persistant en prévision. 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). Finalement, ce schéma d'assimilation assure que la somme des débits corrigés est égale au débit mesuré à la station. On notera que le débit assimilé pour la correction des états du sous-bassin versant intermédiaire est une valeur estimée à partir de ce débit mesuré.

2.5 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 – tel que simulé par le modèle sous influence de l'assimilation – 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, 1970) 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.

3 RESULTATS

3.1 Comparaison de GRPS et GRP

Les distributions des critères calculés sur les événements sont représentées en Figure 2 pour chaque échéance de prévision d'intérêt. En plus des performances de GRP et GRPS, celles du modèle « naïf » persistant (débit prévu constant égal à la dernière observation assimilé) sont présentées afin de rappeler l'intérêt d'une modélisation hydrologique en prévision. 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.

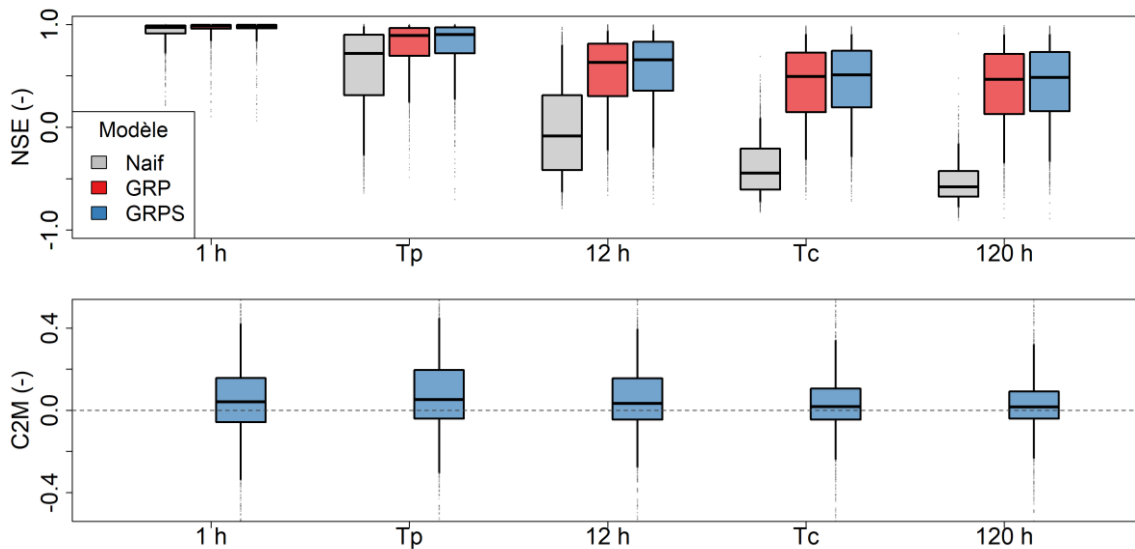


Figure 2. Distribution des performances du modèle « naïf » persistant, de GRP et de GRPS sur les 1360 événements de crue de l'échantillon pour différentes échéances de prévision. Les boîtes à moustaches représentent les quantiles 5%, 25%, 50%, 75% et 95%.

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 témoignent 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.

3.2 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 et les événements très courts en général (Merz et al., 2009 ; 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.

Pour ce qui est des facteurs explicatifs des performances comparatives GRPS par rapport à GRP, les distributions de C2M sont montrées en Figure 3 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).

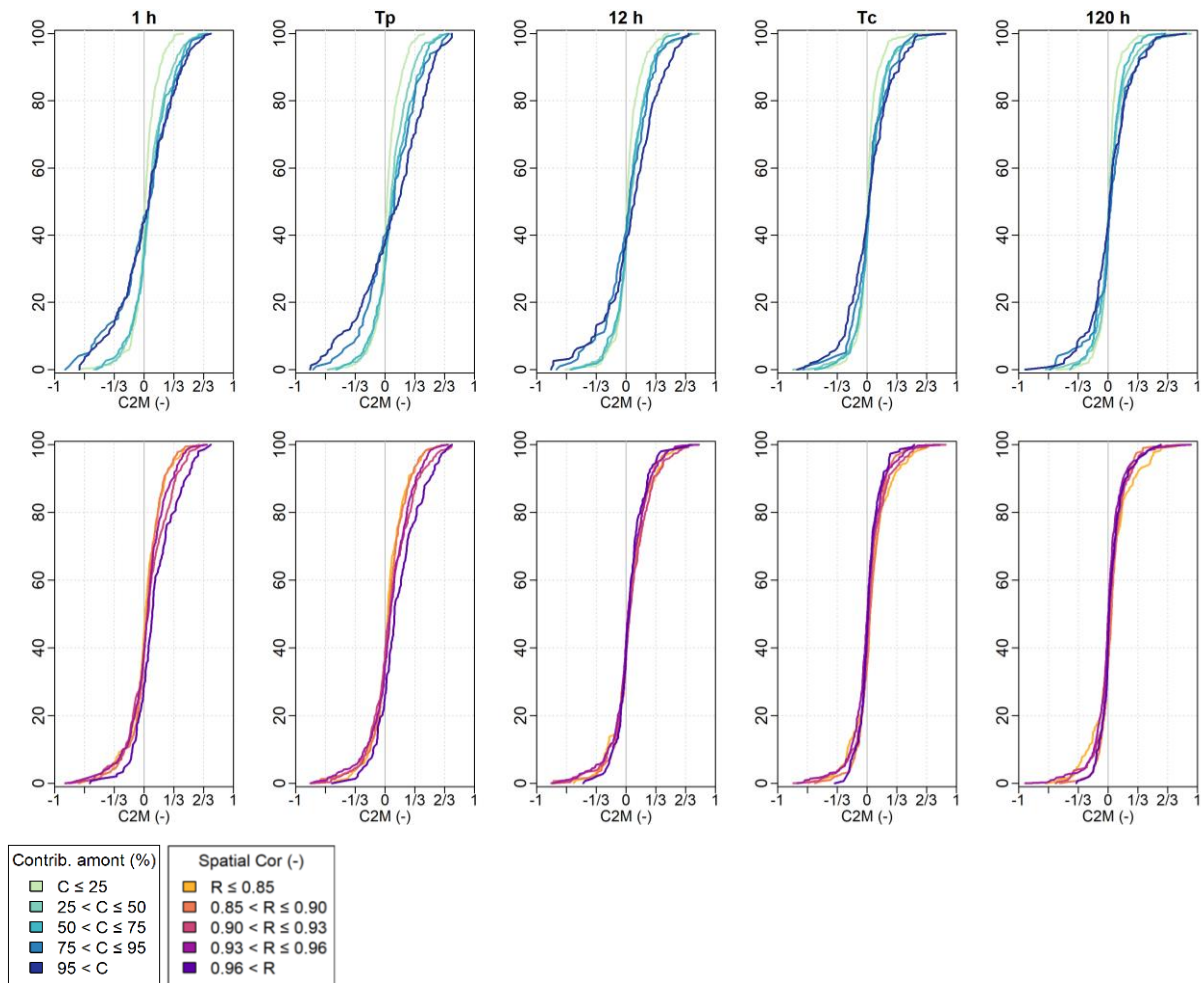


Figure 3. Distribution des performances de GRPS par rapport à GRP par classe d'événements pour différentes échéances de prévision. En haut, les classes d'événements sont construites à partir des contributions relatives des sous-bassin amont. En bas, les classes d'événement sont construites à partir de la corrélation spatiale des hydrogrammes observés aux différentes stations, en prenant en compte le décalage temporel.

4 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.

4.1 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 4. 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.

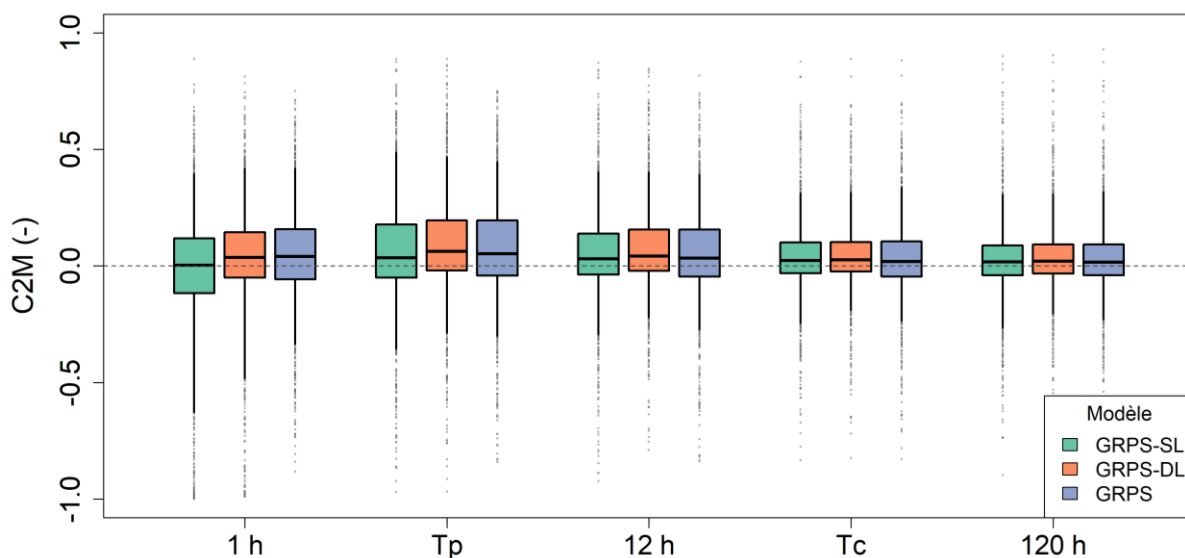


Figure 4. Distribution des performances par rapport à GRP des modèles alternatifs à GRPS pour différents horizons de prévision sur les événements de l’échantillon.

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 1 h, 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 ; Lobligeois, 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 1 h 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.

4.2 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 5.

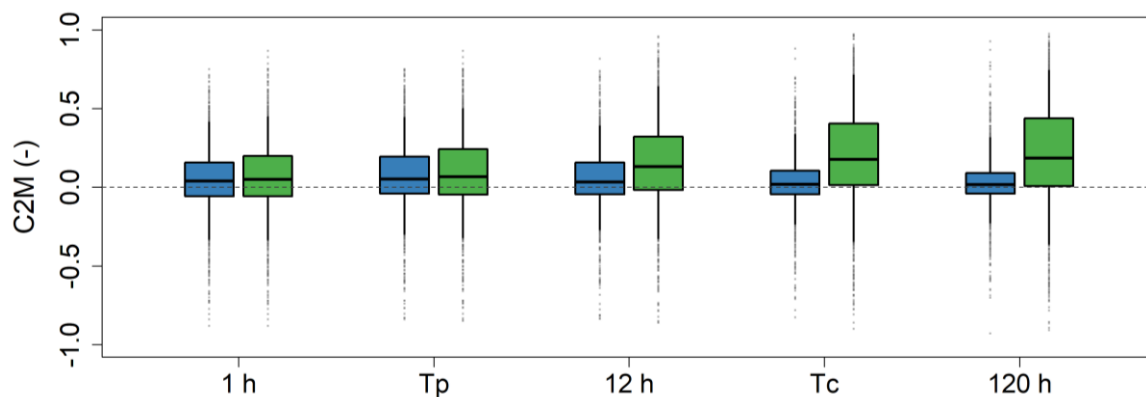


Figure 5. Distribution des performances par rapport à GRP de GRPS (bleu) et de GRPS idéalisé (avec observations amont) (vert) à différents horizons de prévision sur les événements de l’échantillon.

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 l’échéance 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.

5 CONCLUSION

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 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.

6 REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce à la mise à disposition des données climatiques par Météo-France et des données hydrologiques par le SCHAPI. Ce travail a bénéficié du financement de la DGPR (convention SNRH-INRAE) et du projet RenovRisk-Transfert. Nous remercions

également Cyril Thébault pour nous avoir fourni l'échantillon de bassins versants qu'il a constitué pour sa thèse et pour sa critique méticuleuse des données. Enfin, nous remercions l'entreprise Hydroclimat pour avoir accordé du temps au premier auteur pour finaliser l'écriture de cette communication.

7 REFERENCES

- 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-Garretón, 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.
- 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. : 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.
- 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.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., et Bourgin, P. : Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group, Antony, 10, 2020.
- 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., et 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.
- 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.

- 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.
- Merz, R., Parajka, J., et Blöschl, G. : Scale effects in conceptual hydrological modeling. Water resources research, 45(9), 2009.
- 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.
- 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.
- 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.
- Piazzzi, G., Thirel, G., Perrin, C. et Delaigue, O. : 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(4), 2021.
- 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.
- 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.
- 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.
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., et Soubeyroux, J. M. : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International journal of climatology, 30(11), 1627-1644, 2010.