



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

L2.2 Rapport sur la mise au point des modèles et l'analyse de leur sensibilité à différents aspects



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., Tilmant, F., Astagneau, P., Thirel, G., de Lavenne, A., Delaigue, O., Andréassian, V., Perrin, C. (2023). Rapport sur la mise au point des modèles et l'analyse de leur sensibilité à différents aspects. Rapport final du projet de recherche ReNovRisk-Transferts, Action 2 Aléas hydrologiques, OSU Réunion, INRAE (UR HYCAR, Antony), 26 pp.

Résumé

Cette partie du projet s'est intéressée au test de modèles hydrologiques à haute résolution sur des bassins de la Réunion et à l'évaluation de leurs performances, en particulier sur des événements extrêmes en conditions cycloniques. Les travaux ont mis en œuvre un modèle hydrologique semi-distribué, le modèle GRSD, avec des résolutions spatiales variées.

Les résultats d'implémentation du modèle montrent des résultats intéressants. C'est davantage le découpage en sous-bassins via l'approche de modélisation semi-distribuée que la résolution des mailles en elle-même qui joue un rôle sur la réponse du modèle, en comparaison à l'approche globale.

Les tests en conditions cycloniques montrent le rôle prépondérant des intensités des pluies dans la réponse des bassins versants. A ce titre, les processus de genèse du ruissellement par saturation du bassin ne sont pas forcément prépondérants et les processus de dépassement de la capacité d'infiltration doivent être considérés.

Les travaux réalisés pour intégrer dans le modèle les intensités de pluie ouvrent des perspectives prometteuses. Les prochaines versions des outils opérationnels de prévision intégreront ces fonctions et devraient donc permettre des gains sensibles de performance sur ce type d'événements extrêmes. Leur bonne anticipation restera, dans tous les cas, conditionnée par la qualité des observations et prévisions pluviométriques disponibles en temps réel.

SOMMAIRE

Résumé.....	3
Introduction.....	5
Rappel des objectifs généraux	5
Contexte	5
Contenu du présent rapport	5
Prise en compte des intensités de pluie dans un modèle de simulation hydrologique	6
Contexte et objectifs	6
Matériel et méthodes	7
Résultats.....	11
Conclusions.....	14
Implémentation et analyse de sensibilité du modèle GRSD à la Réunion	15
Contexte et objectifs	15
Le modèle GRSD	15
Implémentation de GRSD.....	16
Résultats de simulation	17
Analyse de sensibilité à la résolution spatiale.....	21
Analyse détaillée de sensibilité à la résolution spatiale pour l'événement de 2021.....	22
Conclusion générale	23
Références.....	24

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 de crues 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

La mise au point d'un modèle de représentation des écoulements en contexte cyclonique revêt de nombreux aspects, liés à la complexité des processus en jeu et aux fortes hétérogénéités spatiales et temporelles des événements de crue associés.

Dans le cadre du présent travail, les recherches ont porté sur deux aspects en particulier :

- l'amélioration de la prise en compte des fortes intensités de pluie permettant de générer des phénomènes de crues éclairs ;
- la recherche d'une distribution spatiale permettant de rendre compte de l'hétérogénéité des phénomènes météorologiques et des caractéristiques physiques des bassins versants.

Contenu du présent rapport

Le présent rapport détaille les résultats obtenus dans le cadre des travaux de mise au point des modèles de simulation hydrologique du projet ReNovRisk Transferts. Les travaux se sont attachés à améliorer l'efficacité des modèles et à mieux comprendre leur sensibilité à différents aspects de la modélisation (notamment les données de calage et le découpage spatial).

La première partie du travail a été menée sur un large échantillon de bassins versants métropolitains, avec l'objectif de trouver des solutions générales applicables à des bassins

variés. Dans cet échantillon, la présence de bassins versants soumis à de fortes intensités de pluie (pourtour méditerranéen) garantit la transposabilité des résultats à d'autres contextes. Ces travaux ont été menés par Astagneau (2023).

La seconde partie porte sur l'implémentation d'un modèle semi-distribué sur le territoire de la Réunion, avec une analyse de sensibilité de ses résultats à différents paramètres de modélisation.

Prise en compte des intensités de pluie dans un modèle de simulation hydrologique

Contexte et objectifs

Les crues causées par des précipitations de forte intensité sont difficiles à prévoir. Dans les climats tempérés, elles se produisent le plus souvent en été ou au début de l'automne, lorsque les sols sont relativement secs. Il est courant de lire que les processus d'infiltration et de ruissellement excessif (ou ruissellement hortonien) jouent un rôle majeur dans la génération de ces événements (e.g. Manus et al., 2009). Cependant, certaines études font état de mécanismes de saturation et des contributions des stocks de sub-surface au débit (e.g. Braud et al., 2014). Dans l'ensemble, il existe une interaction entre divers processus générateurs de crues qui dépendent de l'échelle (par exemple Blöschl & Sivapalan, 1995 ; McDonnell et al., 2021), tels que la saturation locale du sol et les seuils de connectivité entre les versants et le réseau de cours d'eau. Enfin, ces crues sont souvent caractérisées par des temps de réponse courts aux précipitations, ce qui les rend plus difficiles à prévoir car moins de données sont disponibles pour l'estimation des paramètres et l'évaluation des simulations.

Pour le calcul de la production de ruissellement, les modélisateurs définissent généralement plusieurs composantes de débit. Cela peut être réalisé en fixant un coefficient de partition à partir d'un seul flux de sortie du réservoir de production, qui peut être un paramètre fixe comme dans les modèles GR (Perrin et al., 2003) ou un paramètre calé comme dans le modèle IHACRES (Jakeman & Hornberger, 1993). La partition du débit peut également être appliquée à plusieurs flux de sortie du réservoir de production du ruissellement, comme dans le modèle MORDOR (Garavaglia et al., 2017). Dans certaines versions du modèle HBV (Seibert & Vis, 2012) et dans le modèle FLEX-Topo (Savenije, 2010), une composante de ruissellement "très rapide" est calculée à partir du réservoir de routage supérieur lorsqu'il atteint un certain seuil. Certains modèles hydrologiques simulent explicitement l'écoulement de surface par infiltration. Leur formulation est souvent basée sur l'équation d'infiltration de Green-Ampt (Green & Ampt, 1911) ou l'une de ses extensions pour estimer le taux de capacité d'infiltration du sol. Ensuite, si le taux d'intensité est supérieur au taux de capacité d'infiltration, la formation de zone d'accumulation de l'eau commence et le ruissellement de surface est généré. C'est le cas de certaines versions de TOPMODEL (Beven et al., 2021) où l'infiltration du sol est basée sur une extension de l'équation de Green-Ampt. Certains modèles hydrologiques, comme le modèle SWAT (Arnold et al., 2012), incluent la méthode SCS-CN pour estimer le ruissellement de surface. Plusieurs études se sont concentrées sur la modification de la formulation SCS-CN afin d'améliorer la simulation du débit des cours d'eau. Dans le modèle de surface terrestre JULES (Best et al., 2011), une composante locale du ruissellement de surface est calculée lorsque le taux d'écoulement devient supérieur au taux d'infiltration maximal. Largeton et al. (2018) ont montré que le calcul d'un taux d'infiltration maximal

variable n'était pas suffisant pour surmonter les déficiences du modèle dans le cas de crues dues à des précipitations intenses. Beven (2021) soutient que si nous pouvons faire des prévisions locales du ruissellement dû à l'infiltration, il n'est pas possible d'estimer sa contribution à l'hydrogramme de crue à plus grande échelle. Une façon de traiter ce problème est d'augmenter les résolutions temporelles et spatiales des modèles avec une description "exhaustive" des processus, mais ces modèles souffrent de problèmes de surparamétrage (par exemple Beven, 1993), en particulier lorsqu'il n'y a pas d'autres données que le débit pour la validation du modèle. Plusieurs modèles conceptuels de ruissellement pluvial utilisent des fonctions spécifiques pour simuler un ruissellement plus important lorsque des précipitations de forte intensité se produisent, même lorsque la teneur en eau du sol est faible. Par exemple, le modèle MODSUR (Ledoux et al., 1989) comporte un paramètre contrôlant le seuil à partir duquel la fonction de production génère du ruissellement pour de faibles conditions antécédentes d'humidité du sol. Ce paramètre dépend du type de sol. Une autre tentative de simulation conceptuelle du ruissellement dû à l'infiltration a été faite par Willems (2014). L'équation conceptuelle de l'infiltration a été modifiée pour simuler un ruissellement plus important en cas d'intensité de pluie et de conditions d'humidité élevées, sans toutefois rendre le coefficient de ruissellement de surface dépendant des intensités de pluie. Récemment, Peredo et al. (2022) ont introduit une fonction dans la version semi-distribuée du modèle GR5H pour générer une pluie plus efficace dans le cas d'événements pluvieux de forte intensité dans des conditions d'humidité du sol antécédentes faibles, et ont obtenu quelques améliorations dans la simulation des crues automnales de l'Aude sans dégrader la simulation des crues hivernales.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt d'une meilleure utilisation de l'intensité des précipitations pour informer la structure d'un modèle hydrologique sur la réponse du bassin versant à des événements pluvieux intenses. Trois questions découlent de notre objectif :

1. Quels flux d'un modèle pluie-débit doivent varier en fonction de l'intensité des précipitations à l'échelle de l'événement et du bassin versant ?
2. Pouvons-nous identifier les bassins versants et les conditions hydrométéorologiques pour lesquels les fonctions de taux d'intensité des précipitations améliorent de manière significative la simulation des crues ?
3. Existe-t-il suffisamment d'informations dans les séries chronologiques de précipitations et de débit pour dériver des valeurs de paramètres stables dans le temps associées aux nouvelles fonctions de modélisation ?

Pour répondre à ces questions, nous avons développé un grand nombre d'hypothèses de modélisation visant à modifier dynamiquement les stocks et les flux d'un modèle pluie-débit en utilisant les intensités des précipitations.

Matériel et méthodes

Bassins versants et données

Notre ensemble de bassins versants est issu des travaux de Ficchi et al. (2016). Il se compose de 229 bassins versants à travers la France métropolitaine, représentant une variété de conditions hydroclimatiques, où les activités humaines et les processus nivaux ont des impacts limités sur les débits des rivières. Les données pluviométriques proviennent de la réanalyse Comephore (Tabary et al., 2012), qui fournit des données à une résolution de 1 km, et sont

agrégées à l'échelle du bassin versant. Les séries temporelles quotidiennes d'évaporation potentielle ont été calculées à l'aide de la formule d'Oudin et al. (2005) en utilisant les séries temporelles quotidiennes de la température provenant du produit SAFRAN (Delaigue et al., 2020 ; Vidal et al., 2010). Ils ont ensuite été désagrégés au pas de temps horaire en appliquant une distribution parabolique entre 6:00 AM et 7:00 PM (UTC). Les séries instantanées de débit ont été extraits de la base de données hydrométrique française (Leleu et al., 2014) et interpolés au pas de temps horaire. Au total, 19 années de séries météorologiques horaires et entre 8 et 19 années de séries de débit horaire étaient disponibles pour ces bassins versants. Deux sous-périodes indépendantes de 9,5 ans chacune ont été définies. La première période (P1) va du 1er janvier 2000 au 30 juin 2009 et la seconde période (P2) va du 1er juillet 2009 au 31 décembre 2018.

Pour les deux sous-périodes, une procédure automatisée a été utilisée pour sélectionner les événements de crue. Les débits de pointe supérieurs au 95e quantile de débit ont été sélectionnés. Ensuite, le début d'un événement a été défini comme le moment où le débit dépasse 20 % du pic de crue. La fin d'un événement a été définie comme le moment où le débit est inférieur à 25 % du pic de crue. Cette sélection a permis d'obtenir un ensemble de 10 652 événements de crue. Les événements pluviométriques correspondants ont été sélectionnés en décalant la fenêtre temporelle de l'événement de débit par le temps de latence (TL) du bassin versant, qui a été estimé comme le décalage temporel qui maximise la corrélation croisée entre le débit et la pluviométrie. Chaque événement a fait l'objet d'une inspection visuelle afin d'atténuer les erreurs résultant de la procédure automatisée. Les bassins ont été groupés en cinq groupes (voir Figure 1), suivant les caractéristiques détaillées dans le Tableau 1.

- Groupe 1 : les gammes des précipitations et des débits sont plus faibles et les valeurs de la variabilité des conditions d'humidité antérieures à la crue sont plus faibles que les bassins versants des groupes 4 et 5, mais des valeurs plus élevées que les bassins versants des groupes 1 et 2.
- Groupe 2 : ils présentent la dynamique d'écoulement la plus lente, avec les temps de réponse pluie-débit les plus élevés et les valeurs les plus élevées d'autocorrélation de débit à 24 heures.
- Groupe 3 : ils ont une dynamique d'écoulement lente mais des coefficients de ruissellement pluvial plus élevés et des valeurs d'autocorrélation plus élevées à 24 heures et des valeurs plus élevées de l'indice d'humidité que les bassins versants du groupe 2.
- Groupe 4 : ils sont caractérisés par des conditions hydroclimatiques très différentes de celles des bassins versants des groupes 1 à 3. Ils présentent une réponse plus rapide du débit aux précipitations, une plus grande variabilité de l'intensité des précipitations et une plus grande variabilité des conditions d'humidité antécédentes, ce qui indique une forte saisonnalité du débit. Ils sont principalement situés dans le bassin du Rhône et dans la région méditerranéenne. Sept bassins versants sont des affluents de la Seine. Ils partagent la plupart des caractéristiques des autres bassins versants du groupe 4, à l'exception de la gamme des précipitations, qui se situe dans la partie inférieure de la distribution.
- Groupe 5 : ils présentent une plus faible variabilité spatiale des précipitations cumulées. Cela signifie que les champs de précipitations associés à leurs crues peuvent être très variables dans l'espace, mais, si c'est le cas, cette variabilité ne change pas beaucoup d'un événement à l'autre. Ils ont des valeurs de débit plus élevées que les bassins versants du groupe 4. Ils sont tous situés dans le bassin du Rhône et dans la région méditerranéenne.

Characteristic	Type	Definition/reference	Abbreviation
Variability in event rainfall intensity (-)	Event-based	Equation (1)	CV _{intP}
Variability in event cumulative rainfall spatial variability (-)	Event-based	Equation (2)	CV _{spatP}
Variability in event antecedent soil wetness condition (-)	Event-based	Coustau et al. (2015)	CV _{antSWI}
Variability in event duration (-)	Event-based	-	CV _{duration}
Rainfall-runoff lag time (h)	Hydroclimatic	Ficchi (2017)	TL
Wetness index (-)	Hydroclimatic	P_m/PE_m	W _i
Runoff coefficient (-)	Hydroclimatic	Q_m/P_m	R _c
Magnitude of high flows (-)	Hydroclimatic	Q_{99}/Q_m	Q _{mag}
Flow autocorrelation at 24 h (-)	Hydroclimatic	-	R _{Q_24 h}
Magnitude of intense rainfall (-)	Hydroclimatic	P_{99}/P_m ; Ficchi (2017)	P _{mag}

Note: Q_{99} is the 99th streamflow percentile. P_{99} is the 99th rainfall percentile. Q_m is the mean streamflow. P_m is the mean rainfall. PE_m is the mean potential evapotranspiration.

Tableau 1. Caractéristiques utilisées pour la classification des bassins.

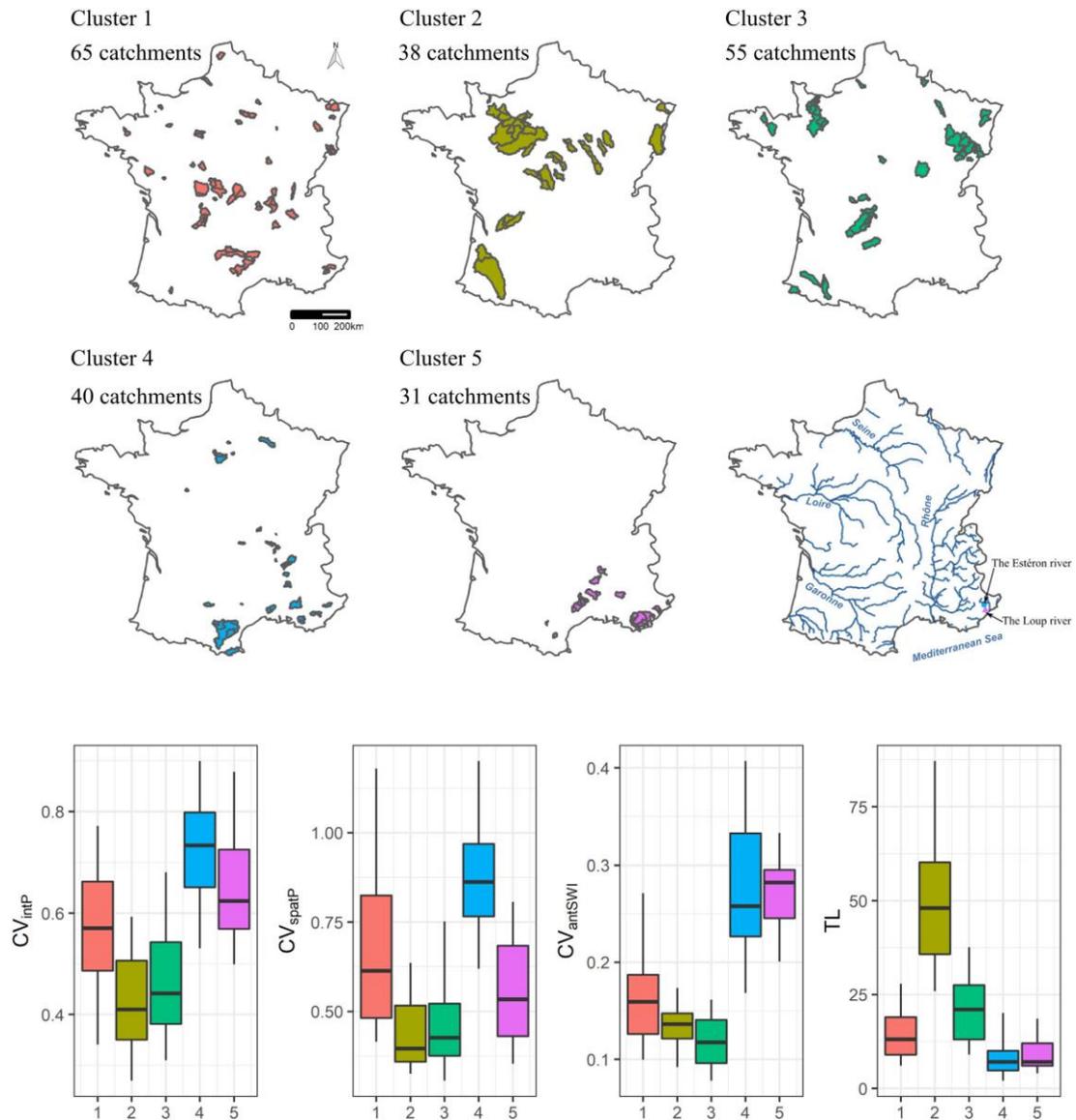


Figure 1. Localisation des cinq groupes hydroclimatiques de bassins versants et répartition de quatre caractéristiques dans ces groupes. Les distributions sont présentées entre les 5e et 95e percentiles

Modèle hydrologique

Le modèle pluie-débit GR5H utilisé dans cette étude se compose d'un réservoir d'interception, d'un réservoir de production, de deux hydrogrammes unitaires (UH) et d'un réservoir de routage. Trois hypothèses de modifications ont été formulées :

- Hypothèse de volume : La première hypothèse repose sur le fait qu'à l'échelle d'un événement pluvieux, lorsque les intensités sont élevées et que l'humidité du sol est faible, le modèle de référence sous-estime le volume de pluie efficace (partie de la pluie nette qui ne s'infiltré pas dans le stock de production).
- Hypothèse de distribution temporelle : La deuxième hypothèse est basée sur l'hypothèse qu'il y a suffisamment de pluie efficace simulée, mais que la distribution temporelle de la pluie efficace devrait être modifiée lorsque les intensités de pluie sont élevées pour permettre à une plus grande partie de la pluie efficace d'atteindre l'exutoire au cours de l'événement.
- La troisième hypothèse est une combinaison des première et deuxième hypothèses.

Les formulations mathématiques de ces différentes modifications sont détaillées par Astagneau et al. (2023). Le Tableau 2 récapitule les versions testées (voir illustration à la Figure 2).

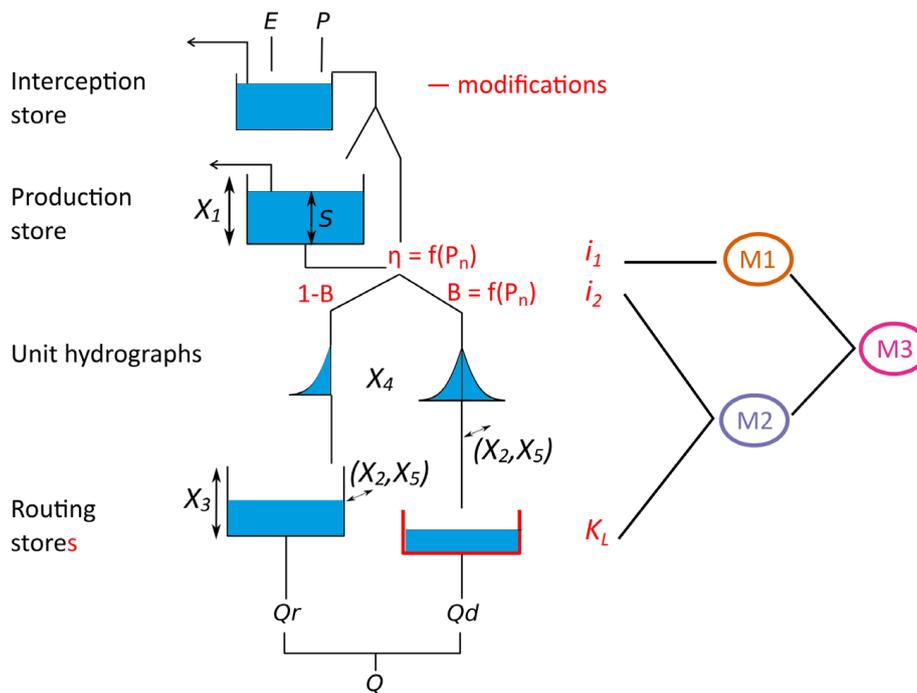


Figure 2. Diagramme des modifications (en rouge) apportées au modèle original GR5H (en noir)

Tableau 2. Versions testées

Modification	Abréviation	Nbre de paramètres libres
Aucune	M0	5
Réservoir de production	M1-Pr	6
Coefficient de partage des deux branches d'écoulement et routage de la branche directe	M2-B	7
Réservoir de production, coefficient de partage des deux branches d'écoulement et routage de la branche directe	M3-Pr-B	8

Evaluation des performances

L'évaluation des performances a été menée avec des critères continus (KGE) et des critères événementiels : critère NSE calculés sur les événements, biais sur les événements et en dehors des événements. L'analyse a été menée par saison, en hiver (novembre à avril) et été (mai à octobre).

Résultats

La Figure 3 montre la distribution des performances du modèle sur les 229 bassins versants et les 10 652 événements de crue. En mode de calibration, pour les deux sous-périodes, les trois versions du modèle montrent une amélioration par rapport à la version de référence M0 (valeurs p de 0,39, 1,8e-3 et 6,0e-4 dans l'ordre de numérotation des modèles) : elles ont des valeurs médianes plus élevées et une dispersion plus faible de l'indice KGE que le modèle de référence (6a). M3-Pr-B présente les valeurs KGE les plus élevées et M2-B les deuxièmes plus élevées (voir le tableau 3 pour la dénomination). En mode de validation, les trois modèles ont des valeurs KGE similaires à celles de M0. M2-B et M3-Pr-B ont des valeurs KGE médianes plus élevées que M0 pour les deux sous-périodes (valeurs p de 0,19 et 0,18 respectivement).

La performance événementielle, évaluée par l'indice NSE, augmente en été pour toutes les versions du modèle (valeurs p de 0,03, 7,0e-5 et 7,2e-6 dans l'ordre de numérotation des modèles), M3-Pr-B ayant les valeurs NSE médianes les plus élevées et M2-B les deuxièmes plus élevées (6b). En hiver, M1-Pr est aussi performant que M0 (valeur p de 0,50). Les valeurs médianes NSE de M2-B et M3-Pr-B sont plus élevées que la médiane NSE de M0 (valeurs p de 1,3e-7 et 7,1e-9, respectivement). En ce qui concerne la performance de l'erreur de volume en été, M3-Pr-B a la valeur médiane la plus proche de zéro et la dispersion la plus faible (6c ; valeur p < 2,2e-16). M1-Pr et M2-B ont tous deux des valeurs médianes plus proches de zéro et une dispersion de l'erreur de volume plus faible que M0 (valeurs p de 1,0e-9 et 1,2e-14, respectivement), M2-B ayant le biais le plus faible des deux. En hiver, l'erreur de volume de M2-B et M3-Pr-B est proche du modèle de référence (valeurs p de 0,80 et 0,32, respectivement). On observe une légère dégradation de l'erreur de volume de M1-Pr vers des valeurs négatives par rapport à M0 (valeur p de 0,01). Les distributions des valeurs d'erreur de volume calculées en dehors des périodes de crues montrent que M1-Pr et M3-Pr-B tendent à produire des surestimations plus importantes du débit en été (valeurs p de 0,08 et 0,36, respectivement) que M0 et M2-B (6d). En hiver, les valeurs médianes de ce critère sont proches du modèle de référence avec une légère dégradation vers des valeurs négatives pour M1-Pr et M3-Pr-B (valeurs p de 0,40 et 0,50, respectivement). M2-B présente une distribution similaire à celle de M0 (valeur p de 0,63). Cet aperçu des performances du modèle a montré que les versions proposées du modèle ont des performances globales similaires, mais que la simulation des crues estivales est améliorée à la fois en termes de NSE et d'erreur de volume. La simulation des crues hivernales n'est pas dégradée et est même améliorée pour M2-B et M3-Pr-B. L'hypothèse de volume conduit à une surestimation du volume en dehors des périodes de crue. Globalement, les améliorations les plus importantes en termes de performance des crues par rapport au modèle de référence sont obtenues par la combinaison des deux hypothèses de modélisation (M3-Pr-B).

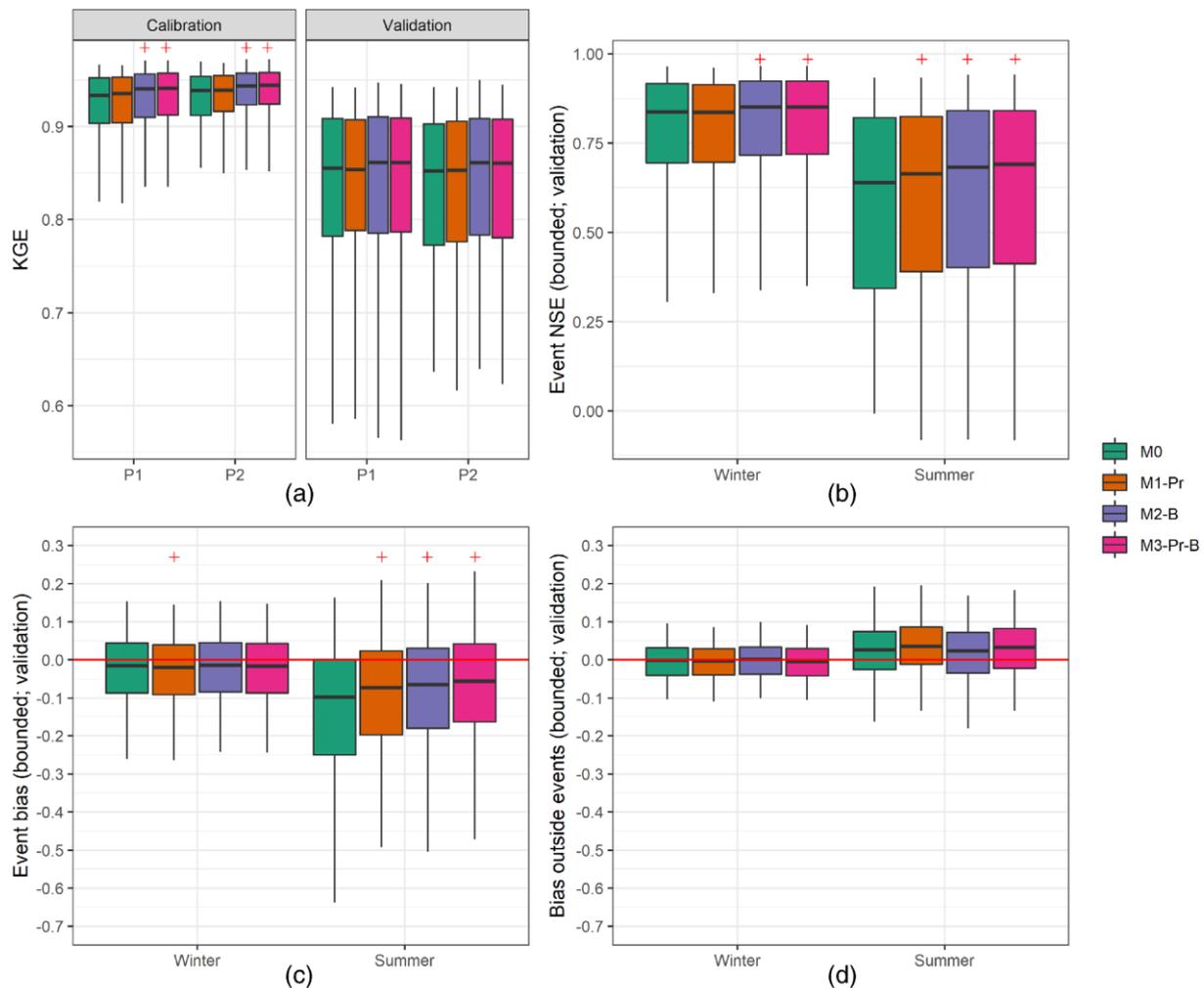


Figure 3. Performance globale (une valeur pour chaque bassin versant) (a), performance dans la simulation de 8290 événements hivernaux et 2362 événements estivaux (b,c), performance hors période de crue (d) pour les trois hypothèses de modélisation par rapport au modèle de référence (valeurs de validation croisée). Les croix rouges indiquent un changement significatif par rapport au modèle de référence. Les distributions sont présentées entre les 5e et 95e percentiles.

La Figure 4 montre la simulation de six hydrogrammes de crue pour deux bassins versants méditerranéens différents avec des réponses typiques du débit des cours d'eau à des précipitations intenses. Les hydrogrammes de crue présentés sur la Figure 4 ont été extraits de deux sous-périodes différentes (périodes de validation P1 et P2), ce qui signifie que les valeurs des paramètres ne sont pas nécessairement les mêmes entre les événements (deux périodes de calibrage différentes ont été utilisées). Le Loup à Tournettes-sur-Loup (206 km², groupe 5) et l'Estéron à Sigale (262 km², groupe 4) sont situés dans le sud de la France. L'Estéron est un affluent du Var et le Loup se jette directement dans la mer Méditerranée. Ces bassins versants se caractérisent par de fortes variations saisonnières du débit et des pentes abruptes. De graves crues peuvent se produire, généralement en hiver ou au début de l'automne, parfois en raison d'événements pluvieux convectifs intenses. Ces exemples ont été choisis pour illustrer nos résultats et compléter la présentation des scores avec des diagrammes en boîte. Ils ne peuvent pas être considérés comme représentatifs des 10 652 événements de notre ensemble de données au sens de l'exploitation des résultats d'une procédure de regroupement.

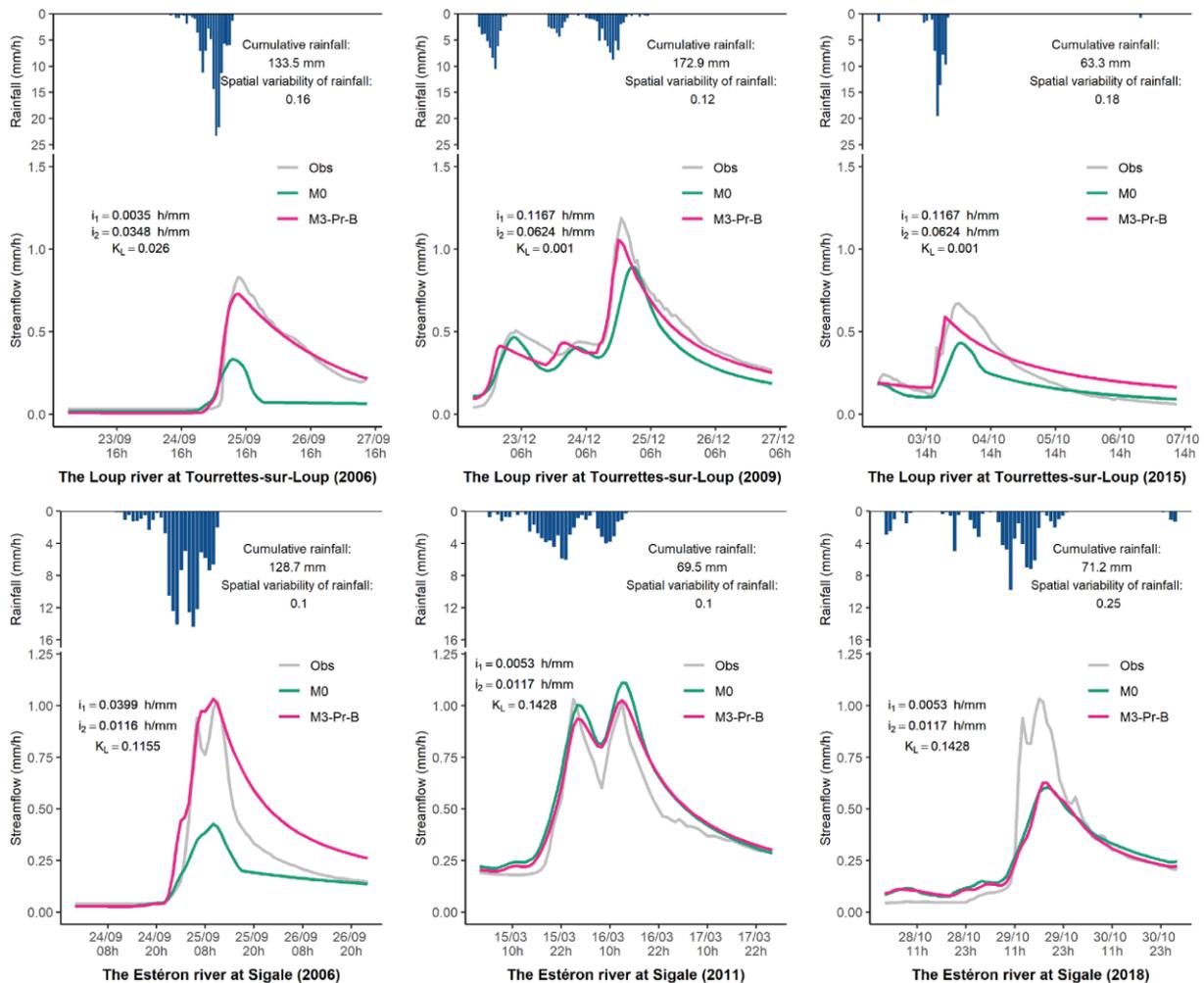


Figure 4. Hydrogrammes simulés (M0 et M3-Pr-B) et observés de six crues survenues sur le Loup à Tourrettes-sur-Loup et l'Estéron à Sigale (valeurs de validation croisée).

La crue estivale de septembre 2006 qui s'est produite dans la rivière du Loup a fait suite à un événement pluvieux intense avec des intensités allant jusqu'à 23 mm/h mais réparties uniformément sur l'ensemble du bassin versant. Pour cet événement, le modèle de référence a clairement sous-estimé les pics et le volume global de la crue. Le modèle M3-Pr-B, quant à lui, a réussi à mieux reproduire le volume et le pic de la crue, bien qu'il soit encore sous-estimé. La crue de décembre 2009 est associée à des précipitations plus importantes, mais moins intenses. Les deux modèles sont capables de reproduire la forme de l'hydrogramme. Au début du mois d'octobre 2015, une crue de moindre ampleur (en termes de pic et de volume) a été suivie d'un événement pluvieux court et intense. La variabilité spatiale de cet événement pluvieux est légèrement plus importante que celle des deux autres événements et la quantité totale de précipitations est presque trois fois plus faible. Pour cet événement, le modèle de référence n'a pas réussi à simuler la réponse du bassin versant, alors que le modèle M3-Pr-B a pu mieux reproduire le pic, le volume et le moment de la crue, avec une légère surestimation du volume de la décrue.

La crue de septembre 2006 qui s'est produite dans la rivière Estéron a fait suite à un événement pluvieux important et intense avec des intensités allant jusqu'à 14 mm/h principalement réparties sur l'ensemble du bassin versant. La réponse du modèle de référence à cet événement a été clairement limitée par rapport à la réponse du bassin versant. La nouvelle version du modèle, en revanche, a réussi à reproduire le pic et le moment de la crue,

mais a surestimé le volume de la décrue. La crue de mars 2011 a été associée à une quantité de pluie plus faible et à des intensités plus faibles, mais a été bien reproduite par les deux modèles. En octobre 2018, un événement pluvieux avec des précipitations cumulées du même ordre de grandeur que la crue hivernale de 2011, mais très variable dans l'espace, a entraîné une réponse rapide et intense du bassin versant. Les deux modèles ont largement sous-estimé le volume et le pic de crue de cet événement.

Conclusions

L'objectif de cette étude était d'utiliser l'intensité des précipitations comme indicateur de l'activation des processus hydrologiques rapides afin d'améliorer la simulation des crues estivales par un modèle conceptuel de pluie et de ruissellement. Nous avons travaillé à l'échelle du bassin versant, avec un grand ensemble de bassins versants, et avons formulé trois hypothèses de modélisation sur la dépendance des flux de notre modèle aux taux horaires d'intensité des précipitations :

- La première hypothèse consiste à supposer que les fortes intensités de précipitations augmentent le volume des précipitations effectives.
- La deuxième hypothèse consiste à supposer que les fortes intensités de précipitations induisent un acheminement plus rapide des précipitations effectives vers l'exutoire du bassin versant.
- La troisième hypothèse combine les deux premières hypothèses, en modifiant à la fois le volume et l'acheminement des précipitations efficaces.

Nos résultats ont montré que les trois hypothèses augmentaient la capacité du modèle hydrologique à simuler les crues estivales, notamment en termes d'erreur de volume, et en particulier pour les affluents du Rhône et les bassins versants situés dans la zone méditerranéenne. La troisième hypothèse montre la meilleure performance dans la capture de la réponse du débit des cours d'eau à des tempêtes plus hétérogènes en été, tout en maintenant une bonne performance dans la simulation des crues hivernales. Nous avons baptisé ce nouveau modèle GR5H-RI. Nos résultats indiquent qu'il est clairement avantageux d'introduire une dépendance des stockages et des flux d'un modèle conceptuel forfaitaire par rapport à l'intensité des précipitations (au moins au pas de temps horaire). Notre travail présente évidemment certaines limites ; la configuration forfaitaire testée ici peut être restrictive pour certains bassins versants, en particulier lorsque l'organisation spatiale des précipitations varie d'un événement à l'autre. En outre, les valeurs des paramètres supplémentaires sont difficiles à estimer, car les fonctions dépendant de l'intensité ne sont activées que sur un très petit nombre de pas de temps. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé des valeurs par défaut pour deux des paramètres supplémentaires, qui entraînent une diminution de la performance du modèle par rapport au modèle entièrement calibré, mais qui permettent néanmoins une meilleure simulation des crues par rapport au modèle de référence. La régionalisation des paramètres de la fonction dépendant de l'intensité (avec des relations entre ces paramètres et les propriétés météorologiques du bassin versant) serait une autre solution.

Nous espérons qu'une meilleure simulation des crues dues à des précipitations intenses permettra d'améliorer la prévision des crues, à condition que nos fonctions soient compatibles avec l'assimilation des données en temps réel sur les précipitations et les débits des cours d'eau. Il est possible d'utiliser les hypothèses de modélisation proposées dans un contexte

méditerranéen, d'autant plus qu'une intensification des événements pluvieux extrêmes est à prévoir avec le changement climatique dans certaines parties de cette région (p. ex. Tramblay & Somot, 2018). D'autres tests seront effectués dans des études futures afin d'évaluer la valeur de ces fonctions pour simuler et prévoir les extrêmes, par exemple en utilisant des post-estimations des débits de pointe des événements extrêmes qui se sont produits dans les bassins versants méditerranéens (par exemple, la tempête Alex du 2 octobre 2020 dans le sud-est de la France ; Payraastre et al., 2022). Enfin, même si cet article ne traite que de l'application des trois hypothèses de modélisation ci-dessus à la structure GR5H, nous pensons qu'elles peuvent être appliquées à d'autres modèles. En fonction des spécificités de chaque modèle, la première, la deuxième ou la troisième hypothèse peut s'avérer la plus appropriée.

Implémentation et analyse de sensibilité du modèle GRSD à la Réunion

Contexte et objectifs

La forte variabilité spatiale des événements de pluie à la Réunion justifie que l'on veuille en rendre compte dans une modélisation hydrologique visant à simuler les crues. En effet, on peut penser que cette prise en compte explicite permettra de mieux rendre compte de la variabilité des processus de genèse des écoulements rapides et ceux de transferts vers l'exutoire.

Bien qu'une approche totalement distribuée devrait permettre de s'adapter idéalement à des produits pluviométriques fournis sous forme de grille (typiquement des informations radar), cela fait sens de prendre comme unité de modélisation des écoulements une zone permettant leur intégration spatiale, à savoir le sous-bassin, défini par un point de contrôle idéalement jaugé sur lequel on peut vérifier la qualité de la modélisation. L'hypothèse sous-jacente est qu'une discrétisation en sous-bassins est suffisante pour rendre compte des effets de la variabilité interne du bassin versant global (voir par ex. Lobligois et al., 2014), et qu'une discrétisation supplémentaire n'apporte pas réellement d'informations complémentaires. Le bassin versant agissant comme un filtre passe-bas sur les entrées climatiques (Oudin et al., 2004), l'information haute fréquence est en fait lissée et il existe donc théoriquement un seuil de raffinement spatial au-delà duquel il n'y a plus d'intérêt à discrétiser le bassin.

L'objectif de ce travail a été d'évaluer un modèle hydrologique semi-distribué sur les bassins d'étude du projet, d'évaluer sa capacité à simuler des débits, et d'analyser sa sensibilité à différents choix de modélisation.

Le modèle GRSD

Le modèle GRSD (voir Figure 5) est un modèle pluie-débit développé à INRAE Antony. Il a été initié dans le cadre des travaux de thèse de Lobligois (2014). Il s'agit d'une version semi-distribuée d'un modèle pluie-débit conceptuel (GR5H). L'approche semi-distribuée permet de diviser les bassins versants en sous-unités hydrologiques (des bassins versants intermédiaires) au niveau de chacune des stations hydrométriques d'intérêt. Les débits de ces bassins intermédiaires sont simulés par le modèle global à partir des données d'entrées agrégées (pluie, température, évapotranspiration), puis sont propagés vers les stations situées à l'aval selon un réseau de routage établi à partir de la topographie du bassin versant.

Les débits simulés sur chaque sous-bassin amont sont combinés à partir d'un module de propagation hydraulique linéaire, consistant en une simple translation temporelle basée sur un paramètre de célérité (C en $m.s^{-1}$) et la distance hydraulique entre exutoires (L_h en m) afin de calculer le débit de l'exutoire jaugé en aval.

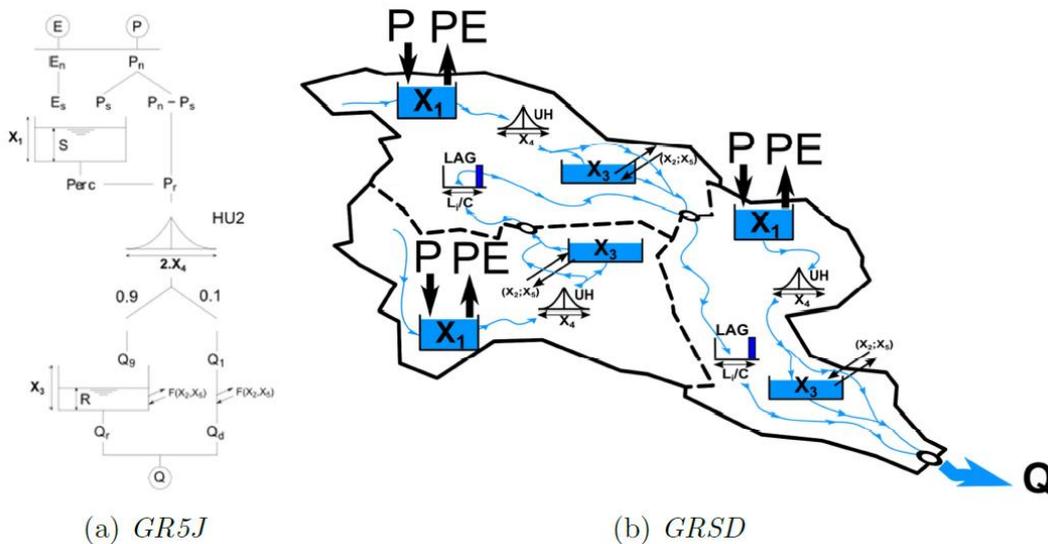


Figure 5. Représentation schématique des modèles GR5 (a) et GRSD (b) (d'après de Lavenne et al., 2016)

Implémentation de GRSD

Dans le cadre de ce travail, le maillage a été réalisé pour différentes surfaces cibles à partir d'un traitement automatique du MNT de l'IGN disponible à la résolution de 5 m (RGE ALTI). Le Tableau 3 présente les différents maillages obtenus pour les trois bassins étudiés et la Figure 6 présente la configuration SD-1km². Un maillage spécifique (SD) a également été réalisé pour deux bassins versants étudiés dans le cadre du stage de M2 de Maxime Gautier réalisé au sein du Laboratoire Géosciences Réunion en 2021 ; nous avons ajouté des points intérieurs pour contraindre le maillage à produire la même délimitation des sous-bassins versants que celle proposée dans les travaux de Maxime Gautier.

Les valeurs d'ETP et les précipitations Antilope ont été fournies par Météo-France, les débits aux exutoires ont été fournis par la CVH qui gère les stations hydrométriques. Il s'agit des mêmes données que celles utilisées pour l'étude menée avec le modèle GRP ; elles permettent de réaliser des simulations au pas de temps horaire sur la période 2015-2021.

Tableau 3. Nombre de mailles pour chaque bassin versant en fonction des configurations spatiales étudiées

	SD-1km ²	SD-5km ²	SD-10km ²	SD	Global
Ravine Saint Gilles	31	6	3	10	1
Rivière des Pluies	38	9	4	3	1
Rivière du Mât	145	30	15	NC	1

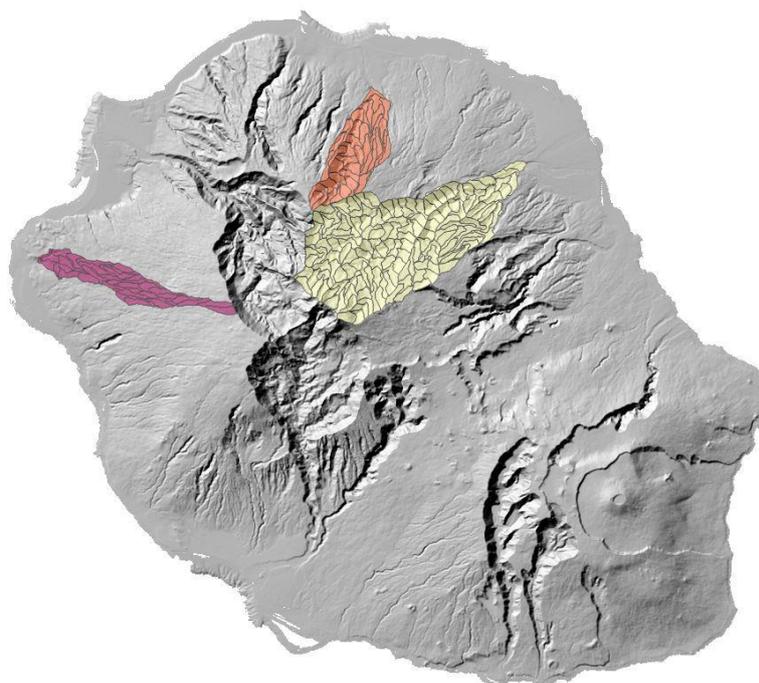


Figure 6: Identification des sous-bassins versants à partir du MNT de l'IGN (RGE ALTI) pour la configuration SD-1km²

Pour chaque configuration spatiale, les paramètres du modèle sont estimés de manière uniforme en utilisant les chroniques de débits à l'exutoire en cherchant à maximiser la fonction objectif KGE sur la période 2015-2021, les forçages de l'année 2014 étant utilisés pour initialiser les états du modèle.

Résultats de simulation

Le Tableau 4 présente les critères de performance KGE et NSE obtenus en simulation avec les cinq configurations spatiales testées. Pour la Rivière des Pluies, les performances ne varient pas en fonction de la configuration spatiale utilisée ; pour la Ravine Saint Gilles, elles ne varient pas pour les configurations semi-distribuées mais elles se dégradent pour la configuration spatiale ; les performances ne varient pas non plus pour les configurations semi-distribuées de la Rivière du Mât, mais on note une nette amélioration des performances avec la configuration globale. Une analyse des paramètres obtenus révèle un comportement atypique pour les configurations semi-distribuées de la Rivière du Mât, ce qui traduit les difficultés que l'on peut rencontrer lors de l'estimation d'un jeu de paramètres uniforme sur un bassin versant hétérogène.

Tableau 4. Performances en KGE et NSE obtenues en simulation

	SD-1km ²	SD-5km ²	SD-10km ²	SD	Global
<i>Ravine Saint Gilles</i>	0.90-0.81	0.91-0.82	0.91-0.81	0.90-0.80	0.75-0.48
<i>Rivière des Pluies</i>	0.87-0.75	0.88-0.75	0.88-0.75	0.88-0.75	0.87-0.75
<i>Rivière du Mât</i>	0.78-0.55	0.78-0.55	0.78-0.55	NC	0.93-0.85

Les Figure 7, Figure 8 et Figure 9 présentent les simulations obtenues pour les trois bassins versants avec deux configurations spatiales contrastées, SD-1km² et Global. Le modèle réussit globalement à reproduire la dynamique en crue, avec cependant des difficultés à être toujours précis sur les pics et à bien simuler les basses eaux. Le comportement atypique obtenu pour la configuration semi-distribuée de la Rivière du Mât est bien visible, avec des récessions très marquées liées à une valeur très élevée du paramètre du réservoir de routage.

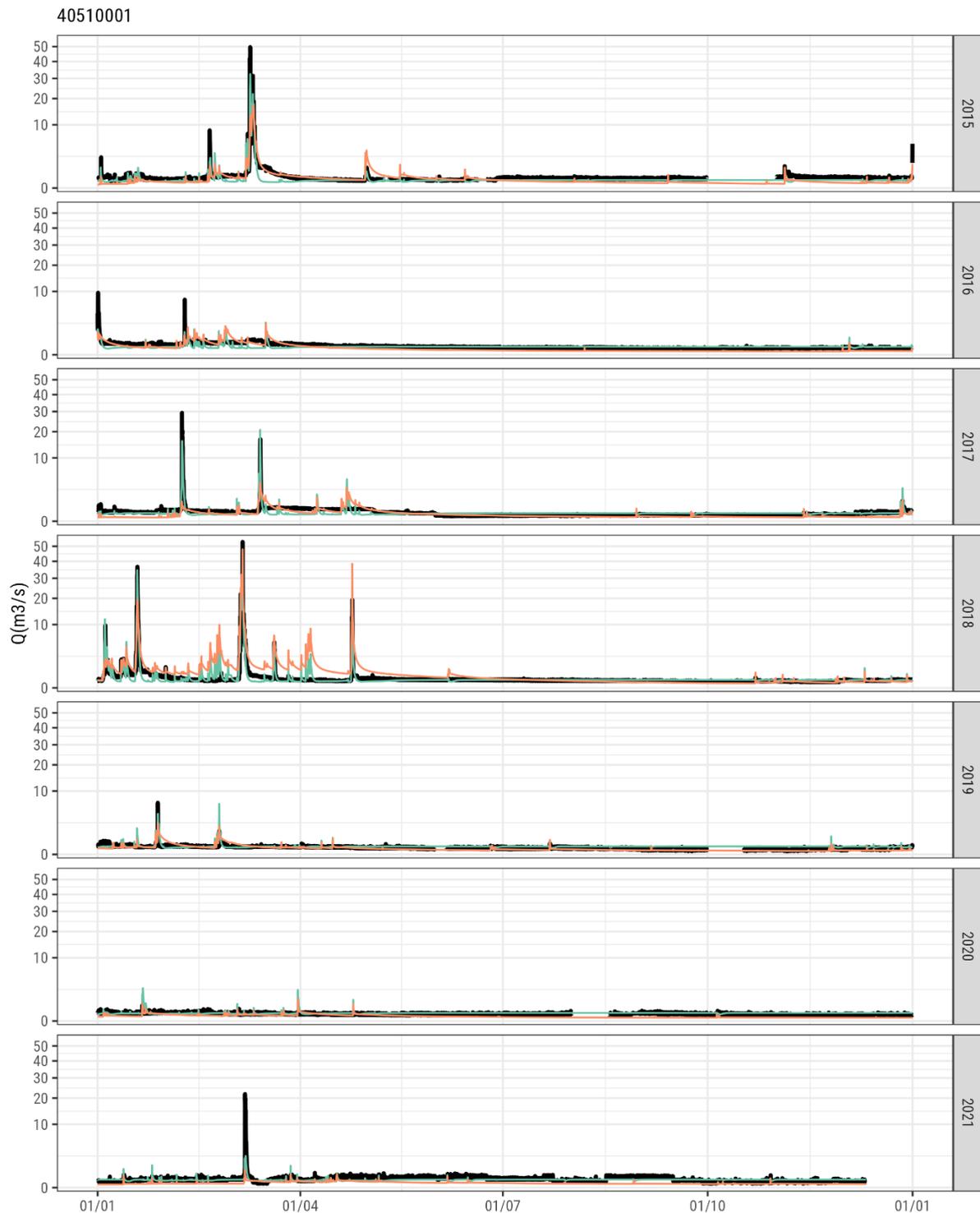


Figure 7. Simulations obtenues avec GRSD sur la Ravine Saint Gilles, en orange simulation en global, en vert SD-1km²

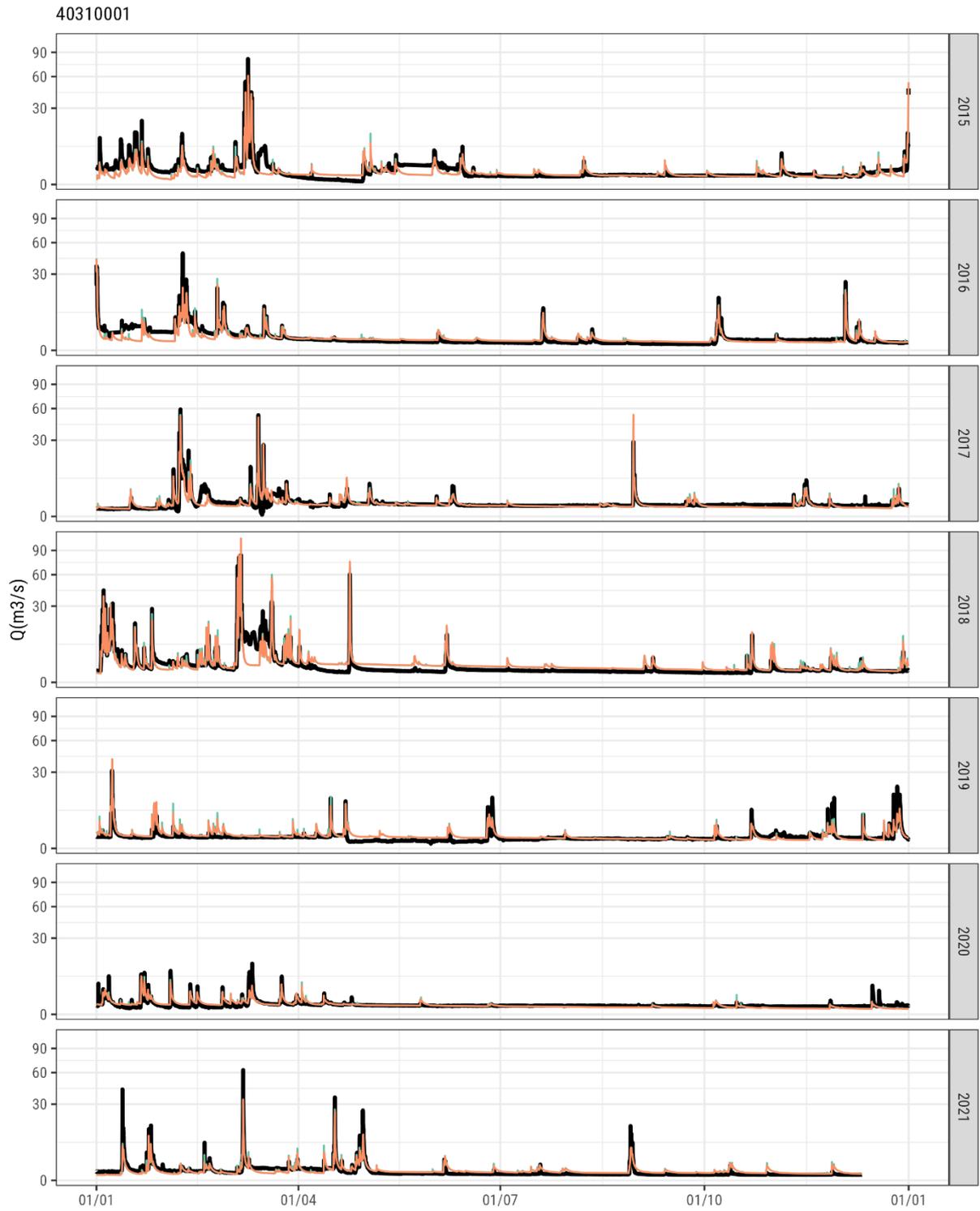


Figure 8. Simulations obtenues avec GRSD sur la Rivière des Pluies, en orange simulation en global, en vert SD-1km²

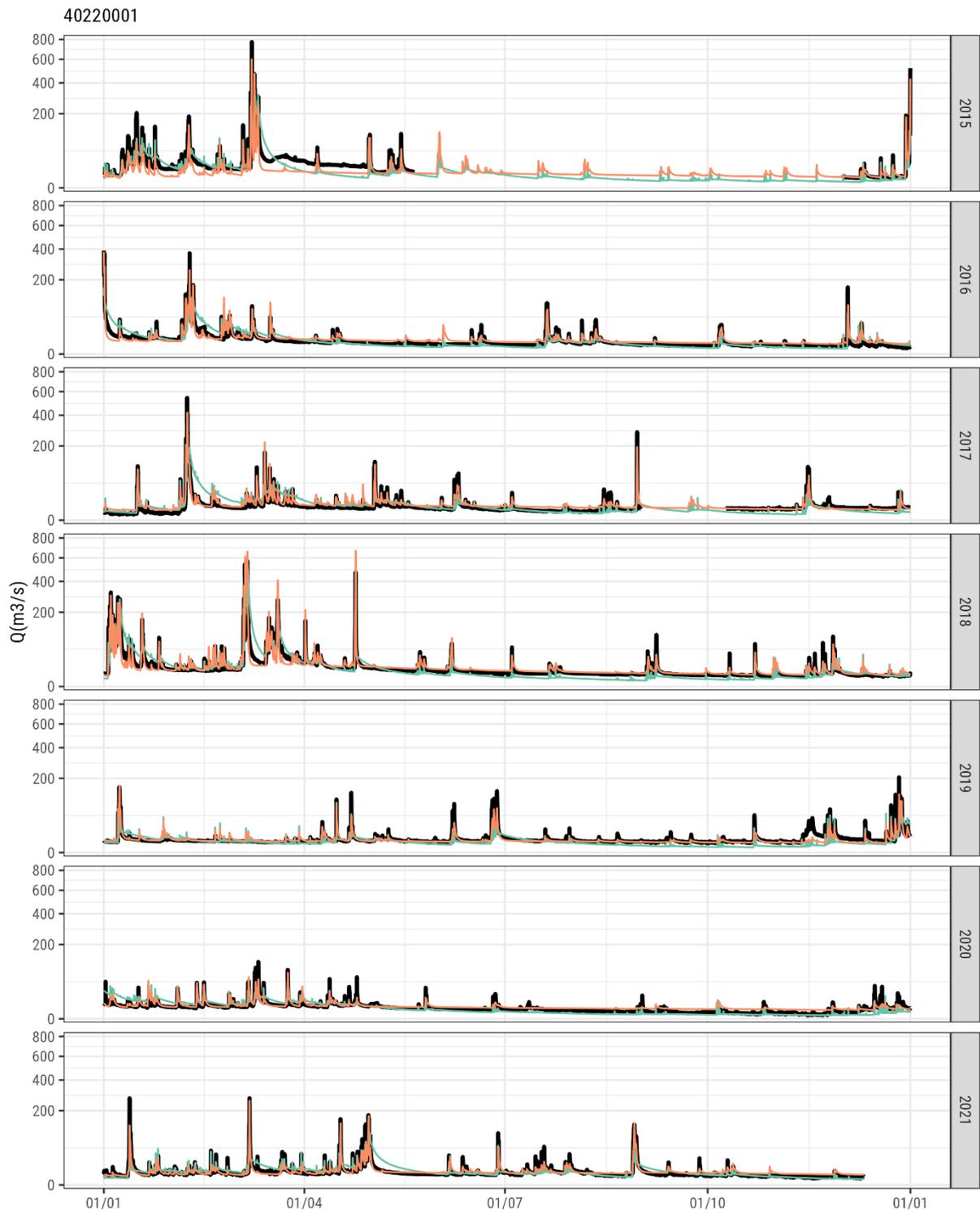


Figure 9. Simulations obtenues avec GRSD sur la Rivière du Mât, en orange simulation en global, en vert SD-1km²

Analyse de sensibilité à la résolution spatiale

La Figure 10 montre de manière plus lisible la sensibilité des simulations de GRSD à différents niveaux de résolution spatiale pour quatre événements marquants : la tempête Haliba en mars 2015, les cyclones Ava et Dumazile en janvier et mars 2018 et le cyclone Habana en mars 2021. Les trois configurations semi-distribuées produisent des chroniques de débits très similaires entre elles et bien distinctes des chroniques obtenues en configuration globale pour la Rivière du Mât (meilleures performances en global, colonne de gauche) et la Ravine Saint Gilles (meilleures performances en semi-distribué, colonne de droite).

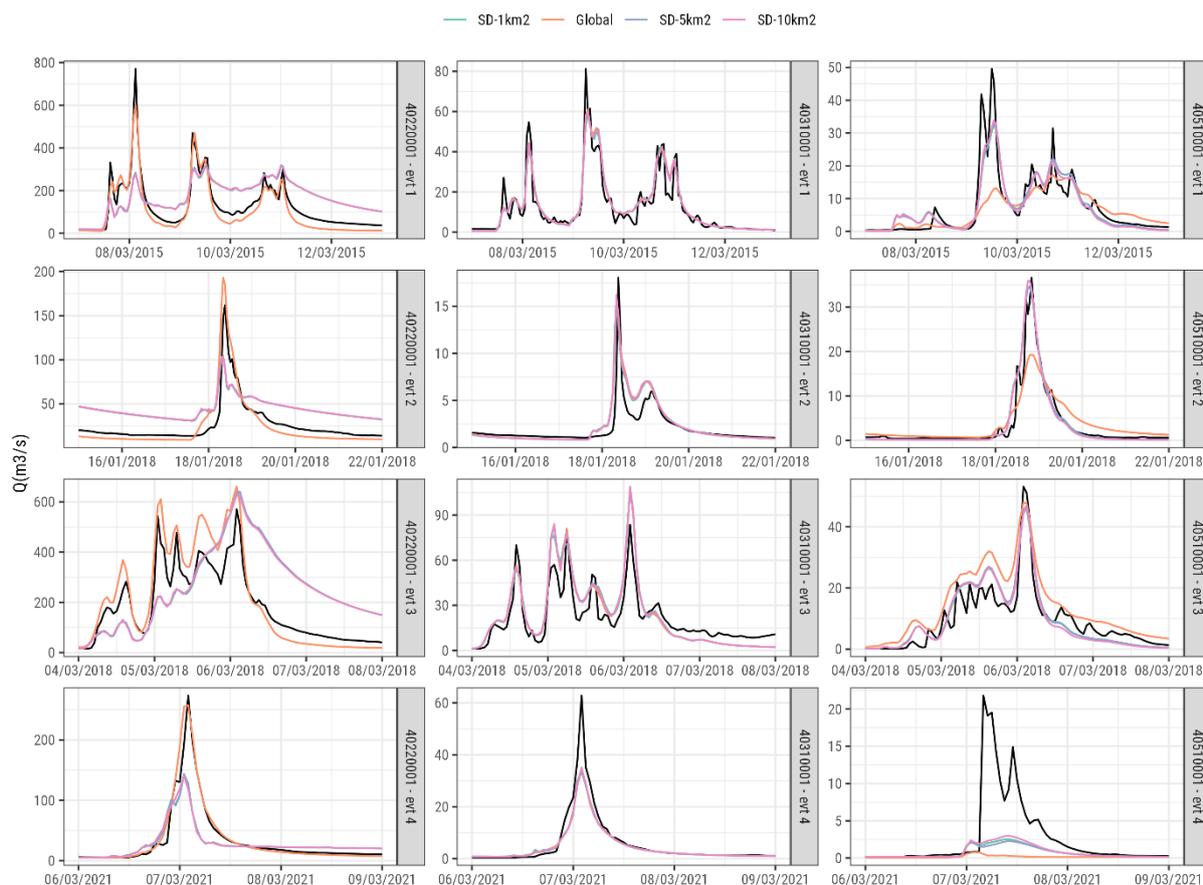


Figure 10. Sensibilité de la simulation de GRSD à quatre résolutions spatiales sur quatre événements majeurs pour les trois exutoires étudiés

La Figure 11 illustre l'impact de la mise en place d'une approche semi-distribuée sur la Ravine Saint Gilles lors de l'événement lié à la tempête Haliba. Les précipitations sont bien plus abondantes en amont – avec un cumul de plus de 600 mm – qu'à l'aval, et les lames d'eau produites par le modèle GRSD pour les différents sous-bassins de la configuration spatiale proposée dans les travaux de Gautier (2021) reflètent cette variabilité spatiale. Il n'a pas été possible dans le cadre de cette étude d'évaluer la pertinence des débits simulés par le modèle GRSD aux points intérieurs mais des travaux complémentaires pourraient se concentrer prochainement sur cet aspect.

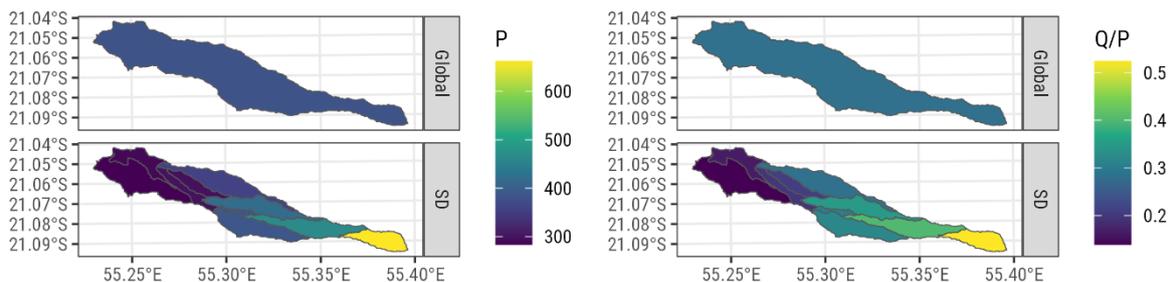


Figure 11. Impact du maillage sur la représentation spatiale des variables hydrologique ; cas de la tempête Haliba sur la Ravine Saint Gilles

Analyse détaillée de sensibilité à la résolution spatiale pour l'événement de 2021

La réponse hydrologique liée à l'événement lié au cyclone Habana en mars 2021 sur la Ravine Saint Gilles est particulièrement intéressante puisqu'on observe sur la Figure 10 une nette sous-estimation de l'ensemble des configurations spatiales testées, ce qui semble indiquer une limite du modèle GRSD pour certaines crues.

L'analyse des états internes du modèle (non présentée ici) indique que le manque de réaction du modèle semble lié à un état de remplissage du réservoir de production particulièrement bas. La Figure 12 montre l'évolution des taux de remplissage des réservoirs de production du modèle, pour les événements Haliba (janvier 2018) et Habana (avril 2021) et deux configurations spatiales. On constate que les taux de remplissage sont nettement plus faibles pour le second événement – ce qui traduit des conditions plus sèches, avec une hausse importante au moment de l'événement Habana. La lame d'eau produite par le modèle GR dans ces situations est bien plus limitée que lorsque le réservoir de production présente des taux de remplissage plus importants et peut expliquer le manque de réaction du modèle pour la crue liée au cyclone Habana. Cette limite a été identifiée dans les travaux de thèse de Paul Astagneau (2023) et les modifications proposées pour prendre en compte l'intensité de pluie dans le fonctionnement du modèle pourraient être testées dans une configuration spatiale semi-distribuée.

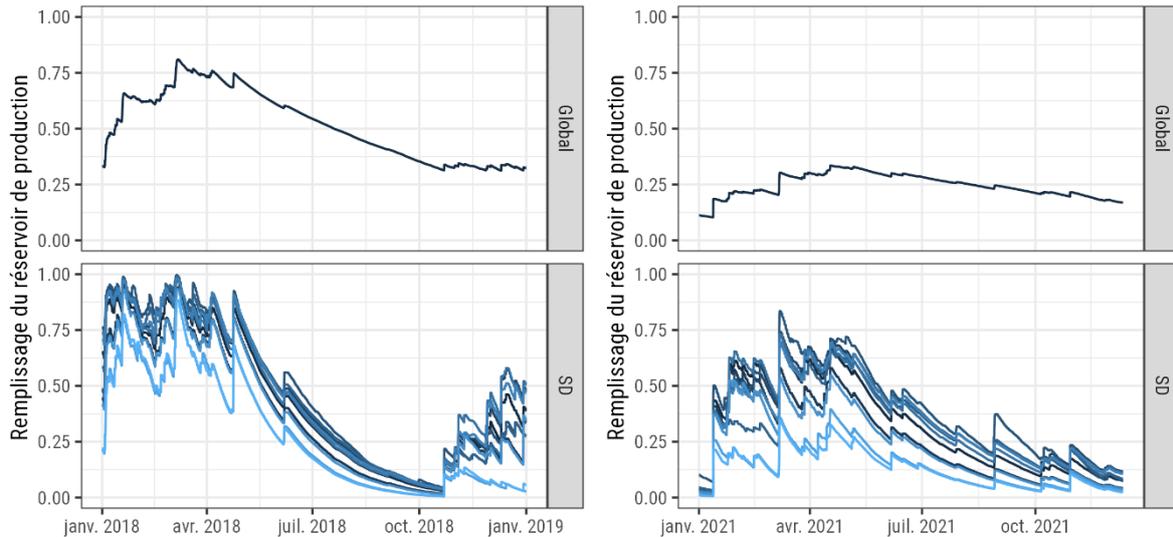


Figure 12. Dynamique du taux de remplissage du réservoir de production du modèle GR pour deux configurations spatiales et deux événements

Conclusion générale

Les résultats d'implémentation du modèle GRSD sur des bassins réunionnais montrent des résultats intéressants. C'est davantage le découpage en sous-bassins via l'approche de modélisation semi-distribuée que la résolution des mailles en elle-même qui joue un rôle sur la réponse du modèle, en comparaison à l'approche globale.

La cohérence globale des sorties du modèle sur les points intérieurs devrait permettre de faire le lien avec les mesures réalisées au sein des bassins versants. Ainsi, les mesures de hauteur pourraient être utilisées à la fois pour mieux contraindre l'estimation des paramètres du modèle, et en temps réel via des procédures d'assimilation. Les fortes incertitudes sur ces mesures, l'absence de jaugeage et leur caractère discontinu n'ont pas permis la réalisation de tests probants mais cela reste une perspective intéressante pour la suite.

Les tests en conditions cycloniques montrent le rôle prépondérant des intensités des pluies dans la réponse des bassins versants. A ce titre, les processus de genèse du ruissellement par saturation du bassin ne sont pas forcément prépondérants et les processus de dépassement de la capacité d'infiltration doivent être considérés.

Les travaux réalisés pour intégrer dans le modèle les intensités de pluie ouvrent des perspectives prometteuses. Les prochaines versions des outils opérationnels de prévision intégreront ces fonctions et devraient donc permettre des gains sensibles de performance sur ce type d'événements extrêmes. Leur bonne anticipation restera, dans tous les cas, conditionnée par la qualité des observations et prévisions pluviométriques disponibles en temps réel.

Références

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Liew, M. W. V., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Best, M. J., Pryor, M., Clark, D. B., Rooney, G. G., Essery, R. L. H., Ménard, C. B., Edwards, J. M., Hendry, M. A., Porson, A., Gedney, N., Mercado, L. M., Sitch, S., Blyth, E., Boucher, O., Cox, P. M., Grimmond, C. S. B., & Harding, R. J. (2011). The joint UKland environment simulator (JULES), model description—Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 677–699. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-677-2011>
- Beven, K. J. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1), 41–51. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(93\)90028-E](https://doi.org/10.1016/0309-1708(93)90028-E)
- Beven, K. (2021). The era of infiltration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 851–866. <https://doi.org/10.5194/hess-25-851-2021>
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., Freer, J. E., & Lamb, R. (2021). A history of TOPMODEL. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 527–549. <https://doi.org/10.5194/hess-25-527-2021>
- Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 251–290. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
- Braud, I., Ayrat, P.-A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Coz, J. L., Nord, G., Vandervaere, J.-P., Anquetin, S., Adamovic, M., Andrieu, J., Batiot, C., Boudevillain, B., Brunet, P., Carreau, J., Confoland, A., Didon-Lescot, J.-F., Domergue, J.-M., Douvinet, J., ... Wijbrans, A. (2014). Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3733–3761. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3733-2014>
- de Lavenne, A., Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., and Ramos, M.-H. (2016). Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model, *Proc. IAHS*, 373, 87–94, <https://doi.org/10.5194/piahs-373-87-2016>.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., and Bourgin, P. (2020). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- 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>
- Gautier M. (2021) Apports de nouvelles données à la modélisation hydrologique de deux bassins versants réunionnais. Estimation de l'impact des vasques naturelles de la Ravine Saint-Gilles. Mémoire de projet de fin d'études. IMT Mines Alès – Laboratoire Géosciences Réunion
- Garavaglia, F., Lay, M. L., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., & Mathevet, T. (2017). Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: From a lumped to a semi-distributed approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3937–3952. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Jakeman, A. J., & Hornberger, G. M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29(8), 2637–2649. <https://doi.org/10.1029/93WR00877>
- Larger, C., Cloke, H., Verhoef, A., Martinez-de-la Torre, A., and Mueller-Quintino, A. (2018). Impact of the representation of the infiltration on the river flow during intense rainfall events in Jules. Technical report, ECMWF, doi: <https://doi.org/10.21957/nkky9s1hs>.

- Ledoux, E., Girard, G., Marsily, G., Villeneuve, J. P., & Deschenes, J. (1989). Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In *Unsaturated flow in hydrologic modelling* (pp. 435–454). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_16
- 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(1), 25–32. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>
- Lobligeois, F. (2014). Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), Irstea (Antony).
- Lobligeois, F., V. Andréassian, C. Perrin, P. Tabary and C. Loumagne (2014). When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18(2): 575-594.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.-P., Creutin, J.-D., Viallet, P., & Gaume, E. (2009). A modeling approach to assess the hydrological response of small mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 79–97. <https://doi.org/10.5194/hess-13-79-2009>
- McDonnell, J. J., Spence, C., Karran, D. J., van Meerveld, H. J. I., & Harman, C. J. (2021). Fill-and-spill: A process description of runoff generation at the scale of the beholder. *Water Resources Research*, 57(5), e2020WR027514. <https://doi.org/10.1029/2020wr027514>
- Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin and F. Anctil (2004). Locating the sources of low-pass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11): W11101, doi:11110.11029/12004WR003291.
- 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(1), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Payrastre, O., Nicolle, P., Bonnifait, L., Brigode, P., Astagneau, P. C., Baise, A., Belleville, A., Bouamara, N., Bourgin, F., Breil, P., Brunet, P., Cerbelaud, A., Courapied, F., Devreux, L., Dreyfus, R., Gaume, E., Nomis, S., Poggio, J., Pons, F., ... Sevrez, D. (2022). The 2nd October 2020 Alex storm in South-Eastern France: A contribution of the scientific community to the flood peak discharges estimation. *Hydroscience Journal*. <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891>
- Peredo, D., Ramos, M.-H., Andréassian, V., & Oudin, L. (2022). Investigating hydrological model versatility to simulate extreme flood events. *Hydrological Sciences Journal*, 67, 628–645. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2030864>
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Savenije, H. H. G. (2010). HESS opinions: “Topography driven conceptual modelling (FLEX-topo)”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2681–2692. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2681-2010>
- Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
- 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 (Vol. 351, pp. 255–260). IAHS Publication.
- Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>

- 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>
- Willems, P. (2014). Parsimonious rainfall–runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes—Part 1: Step-wise model-structure identification and calibration approach. *Journal of Hydrology*, 510, 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.017>