



## PO FEDER 2014-2020

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

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

**N° Convention : GURDTI/20191772-001881**

**N° Synergie : RE0001881**

### **ACTION 2 : Aléas Hydrologiques**

**L2.3.2 Rapport de faisabilité de mise en place d'un outil opérationnel  
de prévision des crues en temps réel**



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, Piazzini 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 :

Tilmant, F. (2023). Rapport de faisabilité de mise en place d'un outil opérationnel de prévision des crues en temps réel. Rapport final du projet de recherche ReNovRisk-Transferts, Action 2 Aléas hydrologiques, OSU Réunion, INRAE (UR HYCAR, Antony), 27 pp.

## Résumé

Les événements de crue que connaissent les bassins versants de la Réunion sont souvent caractérisés par des intensités de pluie fortes, des temps de réaction courts et des dynamiques de montée de crue très rapides. En conditions cycloniques comme en connaît régulièrement l'île, l'estimation des pluies précipitées à l'échelle des bassins versants et la mesure des débits en rivière restent très complexes, conduisant à de fortes incertitudes. La prévision à courte échéance des précipitations demeure elle-aussi un défi. Dans ces conditions, la Cellule de veille hydrologique (CVH) de la Réunion a entrepris une démarche d'amélioration de ses capacités opérationnelles de prévision se basant notamment sur des outils robustes de modélisation hydrologique.

Ce rapport synthétise des travaux menés en partenariat avec la CVH pour l'implémentation opérationnelle du modèle de prévision GRP. Les résultats des tests montrent des performances intéressantes sur une majorité des bassins, malgré une tendance à la sous-estimation des pointes de crue, dont les causes peuvent être multiples. Sur la ravine Saint-Gilles, les résultats sont encourageants. Des pistes d'amélioration existent et devraient donner lieu à des travaux complémentaires.

## SOMMAIRE

Résumé .....	3
Introduction.....	5
Rappel des objectifs généraux .....	5
Contexte .....	5
Contenu du présent rapport .....	5
Base de données .....	6
Extension du domaine d'étude .....	6
Contexte climatique .....	6
Bassins versants étudiés.....	6
Données.....	7
Modèle et méthode d'analyse .....	11
Le modèle de prévision des crues GRP .....	11
Calage du modèle et méthode d'évaluation.....	12
Critères d'évaluation numériques continus .....	13
Critères d'évaluation évènementiels .....	15
Résultats .....	17
Paramétrage du modèle GRP .....	17
Calage final et analyse multicritères expertisée de l'adéquation du modèle.....	18
Résultats détaillés sur la Ravine St Gilles (40510001 — RN1A).....	19
Discussion .....	21
Conclusion .....	25
Perspectives opérationnelles .....	26
Références.....	27

## Introduction

### Rappel des objectifs généraux

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

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

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

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

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

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

### Contexte

A la Réunion, le suivi des crues des cours d'eau est assuré par la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL). L'île de la Réunion est soumise à des événements de crues particulièrement soudains du fait de son relief très marqué et des pluies intenses qui s'y abattent, notamment durant les épisodes cycloniques qui peuvent avoir lieu entre les mois de novembre à mars. La CVH de la Réunion assure actuellement le maintien des appareils de mesures, le suivi des cours d'eau en temps-réel et la diffusion de bulletins de vigilance et d'information. Mise en place relativement récemment, la CVH a engagé ces dernières années une réflexion et des actions, sur la base de propositions d'un Conseil scientifique, pour construire un système et des modèles de prévisions des crues efficaces et adaptés à son territoire.

### Contenu du présent rapport

Le présent rapport détaille les résultats obtenus dans le cadre des travaux sur les actions de test des modèles de prévision du projet ReNovRisk Transferts. Ce travail a été réalisé en concertation avec la CVH Réunion, dans l'objectif de disposer d'outils opérationnalisables (voir Tilmant, 2021).

Dans la suite sont présentés les résultats des performances d'un modèle de prévision appliqué à des bassins de la Réunion.

## Base de données

### Extension du domaine d'étude

L'étude porte sur les bassins versants de la zone-atelier du massif du Maïdo. Bien que l'ambition initiale ait été d'orienter l'étude spécifiquement sur des ravines du versant ouest du Maïdo, les discussions avec les interlocuteurs du projet (Université de la Réunion, Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de la DEAL) ont révélé le manque de données de débit expertisées et fiables dans la zone. Nous avons donc fait le choix en concertation avec eux de mettre à profit les données disponibles en d'autres régions de l'île pour asseoir la mise en place de modèles sur une base solide.

### Contexte climatique

L'île de la Réunion est soumise à un climat tropical humide avec deux saisons météorologiques dominantes :

- La saison des pluies, chaude et humide, a lieu de novembre à mars et c'est également la saison d'apparition des cyclones,
- La saison sèche a lieu de mars à novembre.

Durant la saison cyclonique, l'île peut être frappée par des cyclones dont les vents dépassent les 200 km/h et apportent des précipitations diluviennes.

Différentes études se sont intéressées à la variabilité climatique de La Réunion et fournissent quelques ordres de grandeur des pluies moyennes et extrêmes. En raison de sa situation géographique et de sa topographie, La Réunion compile quelques records mondiaux de précipitations : 1825 mm en 24 h en janvier 1966 (cyclone Denise) et plus récemment 1200 mm sur les sections les plus élevées du territoire en 24 h en janvier 2001 (cyclone Ando) et 190 mm en moyenne sur toute l'île d'après Pohl et al. (2016).

### Bassins versants étudiés

La présente étude porte sur 14 bassins versants, majoritairement répartis au Nord de l'île (11 des 14 bassins), et dont les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau 1. Leurs contours et leurs exutoires sont représentés respectivement en noir et rouge sur la Figure 1. En 2020, la CVH a mené une révision des contours des bassins versants réunionnais. Un écart maximal de 2,5 km<sup>2</sup> entre les périmètres actuels et la vérification a été fixé. Cette limite correspond à la résolution du modèle AROME Océan Indien, facteur discriminant pour un modèle hydrologique pluie/débit intégrant des scénarios de pluies futures. Quelques différences ont été détectées sur plusieurs bassins versants. Cependant, cette vérification du contour des bassins versants a confirmé que les différences relevées ne sont pas de nature à remettre en question les contours actuels des bassins versants.

La distribution des altitudes médianes est assez large allant de 219 m à près de 1450 m et près de 70% des bassins ont une altitude médiane supérieure à 700 m, traduisant le relief particulièrement marqué de l'île. La distribution des altitudes au sein des bassins est également assez forte comme on peut le constater sur la Figure 1 où sont représentées les altitudes en dégradé de vert et jaune et les contours de bassins en noir et dans le Tableau 1 où sont indiquées les altitudes minimales et maximales.

La taille des bassins est également assez variable puisqu'elle varie de 9,5 à près de 150 km<sup>2</sup>.

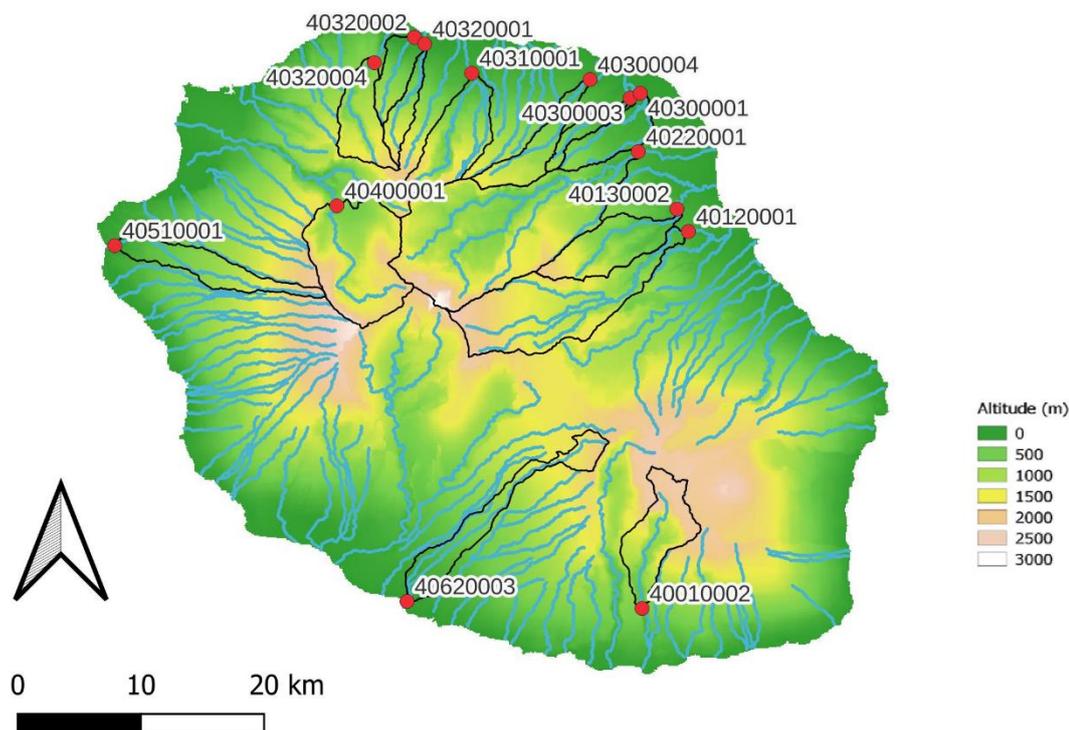


Figure 1. Altitudes (en m) sur l'île de la Réunion et localisation des bassins versants étudiés (contours en noir et exutoires en rouge)

Tableau 1. Caractéristiques des 14 bassins versants étudiés

Code station	Nom de la station	Surface (km <sup>2</sup> )	Altitude minimale (m)	Altitude médiane (m)	Altitude maximale (m)
40010002	Langevin - La Passerelle	36.78	276	1330	2431
40120001	Marsouins – Bethlehem	81.66	78	1420	2770
40130002	Roches – Bassin La Paix	28.64	79	742	2092
40220001	Mat – Barrage	145.64	130	1048	3049
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	23.15	25	219	894
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	23.53	77	879	1627
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	9.52	51	395	1010
40310001	Pluies – Domenjod	39.16	100	935	2259
40320001	Durand – Velodrome	12.81	48	1063	1948
40320002	Butor – Bowling	16.86	18	491	1326
40320004	Saint-Denis – Amont	27.01	346	1097	1953
40400001	Galets – Barrage	68.29	450	1447	2891
40510001	St Gilles – RN1A	30.29	13	765	2382
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	36.54	19	552	2054

## Données

Les données utilisées pour cette étude sont :

- Précipitations : les données utilisées sont issues de la réanalyse ANTILOPE (ANalyse par spaTlialisation hOraire des PrÉcipitations) au pas de temps 15 minutes de Météo-France,

- Débits : les données ont été fournies par la CVH Réunion pour les bassins étudiés. Les courbes de tarage ont été réévaluées suite à l'étude de Viatgé (2019) qui avait mis en évidence quelques problèmes (détarage, valeurs aberrantes...).
- Evapotranspiration potentielle (ETP) : les données ont été fournies par Météo-France pour 16 stations et des ETP de bassin ont été recalculées pour chaque bassin.

#### Données hydrométriques

Les données hydrométriques des 14 bassins versants étudiés sont des données à pas de temps fixe fin (5 min) fournies par la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de la Réunion sur la période couverte par les données de précipitations issues de la réanalyse ANTILOPE (2013 – 2019). Ces données ont été calculées à partir des mesures de hauteurs d'eau à l'exutoire des bassins (points rouges sur la Figure 1) et des courbes de tarage associées.

En termes de qualité des données, les analyses de Bildstein (2017) et Paluszkiwicz (2019) ont soulevé la présence de nombreux détarages au sein des chroniques. Ces observations ont été confirmées par des travaux sur la détection des détarages (Darienzo, 2021). En effet, il arrive régulièrement que suite à des événements pluvieux particulièrement intenses tels que des cyclones, les lits des rivières soient modifiés, impactant ainsi la relation hauteur-débit préalablement établie. En 2020, la CVH a mené un important travail pour reprendre les courbes de tarage des différentes stations hydrométriques en s'appuyant sur une modélisation hydraulique. Dans cette étude, les données validées fournies par la CVH ont été utilisées. Elles n'ont pas été remaniées pour les besoins de GRP. Ces données ont été adaptées au référentiel temporel TU pour les besoins de l'étude..

#### Données de précipitations

Les données de précipitations utilisées sont issues de la réanalyse ANTILOPE. Météo-France a fourni des chroniques continues de précipitations sur la période 01/12/2013 – 31/12/2019. Ces chroniques sont disponibles au pas de temps 15 minutes à l'échelle du bassin versant (référentiel temporel TU). Elles sont issues d'un post-traitement des produits radars et de postes pluviométriques, qui fournit des chroniques à l'échelle du km<sup>2</sup>. Les précipitations ont été agrégées pour fournir une pluie de bassin

Des scénarios de précipitations prévues AROME sont également fournis. Il s'agit pour l'instant d'un produit déterministe contenant un seul scénario moyen. Trois scénarios sont définis à partir de celui-ci:

- Scénario min : valeur minimale d'un pixel de pluie tombée sur le bassin versant,
- Scénario moy : moyenne des pixels de pluie sur le bassin versant,
- Scénario max : valeur maximale d'un pixel de pluie tombée sur le bassin versant.

La mise à disposition d'une approche ensembliste est envisagée. Elle comportera seize membres. La résolution spatiale du produit sera divisée par deux par rapport au produit existant (1,3 km contre 2,6 km actuellement).

#### Données d'évapotranspiration potentielle

Pour fonctionner en continu sur une période de calage la plus longue possible, le modèle GRP requiert une chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP) de bassin continue sur la période de calage. Dans l'étude réalisée par Viatgé en 2019 sur l'évaluation de GRP dans le contexte réunionnais, une approche simple avait consisté à recalculer une évapotranspiration

potentielle de bassin à partir de deux stations, avec une partition en fonction de l'altitude (limite fixée à 700 m). Pour tous les bassins, une pondération était appliquée à chaque station d'ETP, fonction de la surface du bassin située de part et d'autre de l'altitude limite 700 m.

Dans le cadre d'un projet de recherche mené à INRAE Antony avec différents partenaires (PREMHYCE), Météo-France a mis à disposition d'INRAE des chroniques journalières d'évapotranspiration potentielle pour 16 stations de mesure sur le territoire réunionnais. Seule une station (Gillot aéroport) présentant des données sur la période totale de disponibilité des précipitations (12/2013 - 01/2020), une reconstitution de chroniques longues s'est avérée nécessaire sur les 15 autres stations :

- Dans un premier temps, le cumul mensuel d'ETP sur les périodes concomitantes de données a été calculé pour chaque station, y compris la station de l'aéroport. A partir de ces cumuls mensuels, une moyenne interannuelle des cumuls mensuels a été calculée.
- Ensuite, un ratio mensuel moyen ( $ETP_{\text{poste}} / ETP_{\text{aéroport}}$ ) a été calculé pour chaque station. Ainsi, pour les 15 stations, un coefficient mensuel a été obtenu pour les 12 mois de l'année.
- Pour une valeur journalière donnée de la station de l'aéroport, celle-ci est multipliée par le coefficient mensuel du mois de la valeur en question. Ceci a permis de recalculer une chronique journalière complète pour les 15 stations sur la période 1981 – 2020.
- Une fois les chroniques longues reconstituées, une méthode de spatialisation simple de type Thiessen a permis de calculer une chronique d'ETP de bassin en pondérant les stations en fonction de leurs représentativités sur le bassin versant.

Pour descendre à des pas de temps plus fins, une désagrégation des ETP journalières selon une courbe en cloche est opérée par le modèle GRP. Elle admet sa valeur maximale entre 12h et 13h et est nulle entre 20h et 7h. Cette estimation bien que grossière n'a que très peu d'impacts dans la simulation des événements de crues.

#### Débits caractéristiques des bassins étudiés

Afin de se faire une idée des variations de débits sur un bassin, il est intéressant de regarder les quantiles de débit. Pour cela, on peut utiliser la courbe des débits classés.

Le Tableau 2 donne la distribution des débits moyens horaires sur la période 12/2013 - 01/2020 (débit minimal, débit maximal et quantiles 10, 25, 50, 75 et 90).

On constate que pour les ravines, les débits sont très souvent nuls (75% des débits pour les bassins de La Ravine Patate à Durand au Vélodrome (40320001) et de La Ravine Blanche à Z.I. Abattoir (40620003) sont nuls) reflétant le caractère intermittent de ces cours d'eau.

La différence entre le quantile 90% et le débit maximal est très importante pour tous les bassins traduisant le caractère très réactif des bassins versants réunionnais avec des crues intenses et de durées relativement courtes.

Tableau 2 : Distributions des débits moyens horaire entre 12/2013 et 01/2020 pour les bassins versants retenus. Les données sont exprimées en m<sup>3</sup>/s.

Code station	Nom de la station	Débit min (m <sup>3</sup> /s)	Quantiles (m <sup>3</sup> /s)					Débit max (m <sup>3</sup> /s)
			10%	25%	50%	75%	90%	
40010002	Langevin - La Passerelle	0,49	0,70	0,85	1,05	1,40	3,48	167,27
40120001	Marsouins – Bethleem	2,03	3,77	4,34	5,38	7,41	11,05	616,47
40130002	Roches – Bassin La Paix	0,31	0,67	0,88	1,47	3,33	10,19	446,66
40220001	Mat – Barrage	1,13	3,11	4,12	5,41	9,69	20,04	780,50
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	0,03	0,05	0,08	0,30	0,96	1,86	327,92
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	0,02	0,08	0,13	0,24	0,43	0,75	66,43
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	0,01	0,01	0,01	0,18	0,55	1,70	163,01
40310001	Pluies – Domenjod	0,00	0,08	0,23	0,54	0,79	1,53	147,51
40320001	Durand – Velodrome	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	53,17
40320002	Butor – Bowling	0,01	0,03	0,05	0,11	0,77	1,21	127,76
40320004	Saint-Denis – Amont	0,08	0,17	0,58	0,70	0,79	1,09	99,82
40400001	Galets – Barrage	0,26	0,38	0,59	0,80	1,62	3,34	365,07
40510001	St Gilles – RN1A	0,00	0,07	0,09	0,12	0,19	0,30	53,52
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	28,67

#### Temps de réaction et seuils de vigilance

Le temps de réaction a été estimé par une méthode de corrélation croisée qui cherche le décalage temporel qui maximise la corrélation entre les précipitations et les débits. Ce temps de réaction va donner un ordre de grandeur de l'horizon de calage à viser pour qu'il corresponde au temps caractéristique d'un événement de crue. Le Tableau 3 donne, pour chaque bassin, le temps de réaction estimé par corrélation croisée.

Pour chaque station, la CVH a fixé un seuil de vigilance appelé seuil de vigilance jaune. Bien que ce seuil n'ait pas de valeur réglementaire, il correspond à un niveau de vigilance à partir duquel les alertes sont émises. Le Tableau 3 fournit les seuils de vigilance jaunes pour les 14 stations d'étude. Ces seuils ont été ajustés pour les courbes de tarage actualisées.

Tableau 3 : Temps de réaction estimé par corrélation croisée et seuil de vigilance jaune pour les 14 bassins étudiés

Code station	Nom de la station	Temps de réaction	Seuil de vigilance jaune (m <sup>3</sup> /s)
40010002	Langevin - La Passerelle	1h30	50
40120001	Marsouins – Bethleem	2h15	33
40130002	Roches – Bassin La Paix	1h15	50
40220001	Mat – Barrage	1h30	800
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	1h30	57
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	1h15	130
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	2h15	33
40310001	Pluies – Domenjod	1h15	37
40320001	Durand – Velodrome	1h15	67
40320002	Butor – Bowling	0h30	200
40320004	Saint-Denis – Amont	2h	5
40400001	Galets – Barrage	1h30	270
40510001	St Gilles – RN1A	3h	40,38
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	3h	13

## Modèle et méthode d'analyse

### Le modèle de prévision des crues GRP

Le modèle utilisé pour l'étude est le modèle de prévision des crues GRP (modèle du Génie Rural pour la Prévision des crues ; Tangara, 2005 ; Berthet, 2010 ; Viatgé et al., 2019). Le modèle GRP, dont la structure est présentée à la Figure 2, est un modèle global à réservoirs fonctionnant en continu avec trois paramètres à caler que sont :

- CORR (-) : le facteur de correction de la pluie efficace qui permet de prendre en compte les éventuels échanges souterrains en eau,
- TB (pas de temps) : le temps de base de l'hydrogramme unitaire qui permet de tenir compte du décalage temporel entre la pluie et le débit,
- ROUT (mm) : la capacité du réservoir de routage.

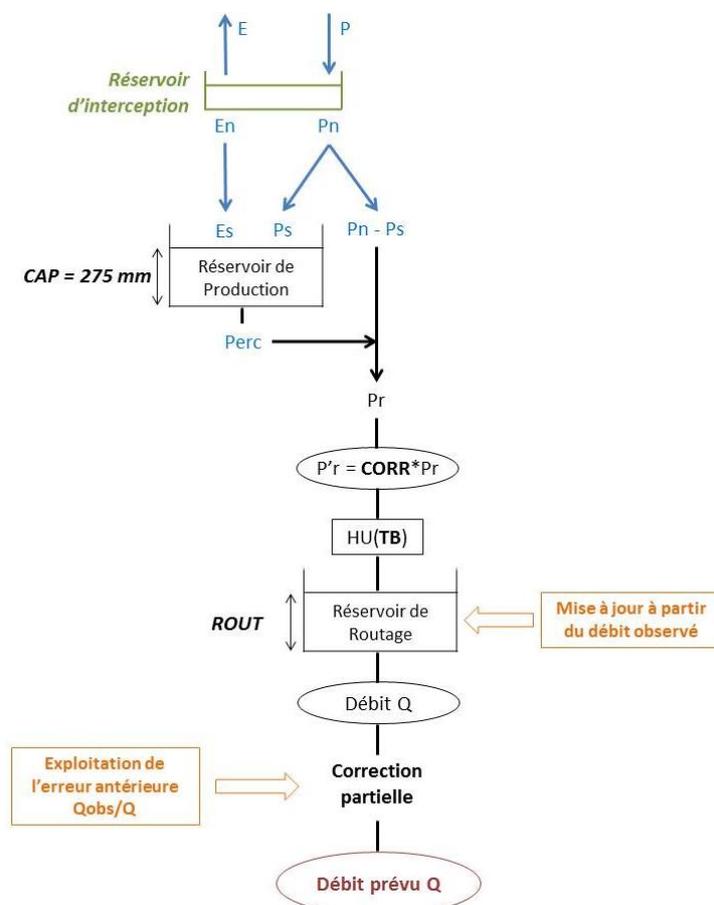


Figure 2 : Schéma de la structure du modèle GRP dans la version fonctionnant à différents pas de temps (Source : Viatgé et al., 2019).

La capacité du réservoir de production a été fixée de manière empirique à 275 mm. Ce réservoir de production peut être assimilé à un réservoir « sol » et sert à déterminer le rendement des précipitations. La version du modèle utilisée ici a été développée récemment, à la suite des travaux de thèse de Ficchi (2018) sur l'adaptabilité des modèles hydrologiques à différents pas de temps. Dans cette version, le modèle peut être utilisé à divers pas de temps allant de l'infra-horaire au journalier (Viatgé et al., 2019). Elle diffère des précédentes par l'ajout d'un réservoir d'interception dont la capacité est fixée à une valeur permettant de retrouver la quantité d'eau interceptée au pas de temps journalier.

Le modèle GRP est découpé en deux modules fonctionnels, suivis d'une procédure d'assimilation :

- Le module de production constitué de l'interception des précipitations, du réservoir de production de capacité CAP, qui détermine le rendement des pluies et produit une percolation Perc, et de la pluie efficace  $P'r$  ;
- Le module de transfert qui correspond à une répartition temporelle de la pluie efficace, constitué de l'hydrogramme unitaire HU et du réservoir de routage de capacité ROU ;
- L'assimilation de données qui est une exploitation de l'information du dernier débit observé.

Cette assimilation de données à partir des derniers débits observés se fait sur deux niveaux :

- La mise à jour du réservoir de routage (avec le dernier débit observé avant l'instant de prévision) : le niveau du réservoir est recalculé de manière à simuler un débit égal au dernier débit observé à l'instant de la prévision ;
- L'exploitation de l'erreur antérieure (avec le dernier débit observé avant l'instant de prévision) : elle peut se faire de deux manières soit via une correction de type autorégressif (méthode Tangara), soit par un réseau de neurones artificiels (méthode RNA).

Le modèle GRP n'a pas besoin d'être initialisé ponctuellement en début d'événement : fonctionnant en continu, il utilise une année de données climatiques (pluie et ETP) pour initialiser l'ensemble de ses états internes.

### Calage du modèle et méthode d'évaluation

#### Méthode de calage « pas-à-pas »

Le calage du modèle est réalisé selon une méthode dite « pas-à-pas » développée par Michel (1991). Partant d'un jeu de paramètres donnés, une fonction objectif est calculée. Un pas de recherche suffisamment fin est ensuite appliqué à chacun des paramètres l'un après l'autre et la fonction objectif est recalculée. Pour chaque amélioration de la fonction objectif, le déplacement de la valeur des paramètres est conservé. Si l'amélioration ne dépasse plus un certain seuil, on considère qu'on a atteint le jeu de paramètres optimal pour le modèle.

La fonction objectif utilisée pour le calage du modèle GRP est l'erreur quadratique moyenne (RMSE) permettant de donner un poids plus élevés aux débits les plus forts, particulièrement intéressant en contexte de prévision des crues.

#### Seuil de calage et horizon de calage

Il arrive que les valeurs basses de débits observées soient bruitées du fait de mauvaises conditions de mesure et cela peut impacter fortement la recherche d'un jeu de paramètres optimal. Pour pallier à cette difficulté, il est également possible de donner au modèle un seuil de calage représentatif du débit minimal au-delà duquel la fonction objectif sera calculée.

Le modèle GRP étant un modèle de prévision intégrant une procédure d'assimilation de données, il convient de parler ici de notion d'horizon de calage. En effet, la mise-à-jour des états internes du modèle ainsi que la correction appliquée sur ses sorties implique que l'erreur faite par le modèle évolue à chaque pas de temps de la prévision entre l'instant de prévision et l'échéance de prévision. On observe que l'erreur augmente à mesure que l'on s'écarte de

l'instant de prévision. La minimisation de la fonction objectif doit donc être réalisée pour un horizon de prévision donné : l'horizon de calage. Le jeu de paramètres calés sera optimal pour cet horizon donné.

#### Méthode d'évaluation du modèle

Pour évaluer le modèle en conditions similaires aux conditions opérationnelles, nous réalisons une procédure dite de calage-contrôle ou calage-validation (Klemeš, 1986). La chronique utilisée pour caler le modèle est découpée en deux sous-chroniques de même taille (qu'on appellera par la suite périodes P1 et P2), puis le modèle est alternativement calé sur une période et évalué sur l'autre période (via des critères de performances présentés dans les paragraphes suivants). Cette méthode, illustrée sur la Figure 3, donne la possibilité d'évaluer qu'elles seraient les performances du modèle s'il était utilisé sur une période qu'il ne « connaît » pas, c'est-à-dire sur laquelle il n'a pas été calé. L'ensemble des critères d'évaluation sont calculés sur les périodes de validation/contrôle.

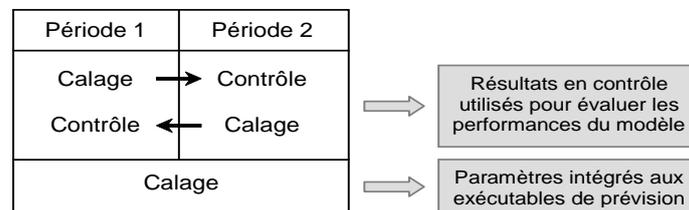


Figure 3 : Illustration de la procédure de calage-contrôle.

#### Critères d'évaluation numériques continus

##### Erreur quadratique moyenne RMSE

On évalue ici l'erreur quadratique moyenne (RMSE pour Root Mean Square Error) définie par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i + L) - Q_{prev}(i + L))^2}$$

où :

- n est le nombre de pas de temps de la chronique étudiée
- i est l'instant de prévision
- L est l'échéance de prévision étudiée
- $Q_{obs}(i + L)$  et  $Q_{prev}(i + L)$  représentent respectivement les débits observés et prévus à l'échéance L

Ce critère est une erreur et sera donc d'autant meilleur que sa valeur sera proche de 0. La RMSE est également utilisée comme fonction objectif pour le calage des paramètres du modèle GRP. En effet, la puissance quadratique permet de donner un poids plus fort aux débits les plus élevés.

##### Critère de persistance C2MP

Le critère de persistance permet de comparer le modèle évalué à un modèle naïf (le modèle de persistance) qui prévoit un débit constant et strictement égal au dernier débit observé à l'instant de la prévision. Le modèle de persistance est souvent bon, donc plus difficile à battre, aux courtes échéances et ses performances se dégradent avec l'augmentation de l'échéance.

Le critère de persistance est défini comme le rapport des erreurs quadratiques moyennes du modèle évalué et du modèle de persistance :

$$\text{Eff} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Qobs}(i + L) - \text{Qprev}(i + L))^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Qobs}(i + L) - \text{Qobs}(i))^2}$$

Les valeurs de ce critère varient entre  $-\infty$  et 1. Une valeur de 1 signifie que l'erreur du modèle évalué est nulle et qu'il est donc parfait. Une valeur nulle indique que le modèle testé a des performances équivalentes à celle du modèle de persistance. Enfin des valeurs négatives peuvent indiquer que le modèle de persistance présente déjà de bonnes performances. Notons que l'erreur du modèle de persistance augmente généralement plus vite avec l'échéance que celle du modèle de prévision testé, ce qui conduit à une augmentation de la valeur du critère de persistance avec l'échéance. Cette augmentation ne doit évidemment pas être interprétée comme une amélioration des performances du modèle testé dans l'absolu. Les valeurs parfois fortement négatives de certains résultats peuvent être délicates à interpréter et biaiser des moyennes de performances faites sur différentes périodes ou un ensemble de bassins. Aussi, une version bornée du critère de persistance, notée C2MP, sera utilisée par la suite et définie comme suit :

$$\text{C2MP} = \frac{\text{Eff}}{2 - \text{Eff}}$$

#### Critères de dépassement de seuil

Les critères de dépassement de seuil présentés ici permettent d'évaluer la capacité du modèle à prévoir des dépassements.

A chaque pas de temps, le débit observé à l'instant de prévision est comparé au seuil de vigilance :

- S'il est supérieur à ce seuil, ce pas de temps est ignoré, car, dans ce cas, le dépassement du seuil est certain pour la prévision ;
- S'il est inférieur à ce seuil, les débits prévus jusqu'à l'échéance valant l'horizon de calage sont comparés à ce seuil. Le tableau de contingence est mis-à-jour si, à un moment donné, le seuil est dépassé en prévision et/ou en observation.

Cela permet de définir quatre configurations :

- (a) Alerte valable : le seuil est dépassé par l'observation et la prévision
- (b) Fausse alerte : le seuil est dépassé par la prévision mais pas par l'observation
- (c) Alerte manquée : le seuil est dépassé par l'observation mais pas par la prévision
- (d) Non alerte valable : le seuil n'est dépassé ni par l'observation ni par la prévision

En classant les prévisions réalisées dans chacune des quatre configurations, on obtient le tableau de contingence telle que présenté au Tableau 4. Les cases (a) et (d) du tableau représentent les cas d'accords entre observation et prévision, les deux autres cases ceux de désaccord. Ce tableau est construit en analysant tous les pas de temps de la période d'étude. Il y a donc un très grand nombre de non-alertes valables (d), mais cela est généralement peu utile pour évaluer les performances du modèle. Les trois autres valeurs du tableau (a, b et c), pour lesquelles la prévision et/ou l'observation ont franchi le seuil, sont plus intéressantes à analyser.

Tableau 4 : Tableau de contingence.

		Observation	
		Dépassement	Non dépassement
Prévision	Dépassement	Alerte valable <sup>(a)</sup>	Fausse alerte <sup>(b)</sup>
	Non dépassement	Alerte manquée <sup>(c)</sup>	Non alerte valable <sup>(d)</sup>

Pour faciliter leur interprétation, trois scores d'efficacité découlant de la table de contingence sont calculés :

a) *La probabilité de détection (POD)*

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

La probabilité de détection représente la probabilité qu'un dépassement de seuil ait été prévu (a) lorsqu'il a effectivement eu lieu (a + c). La valeur idéale de ce critère est 1, correspondant au cas où il n'y a eu aucune alerte manquée (c = 0).

b) *Le taux de fausses alertes (FAR)*

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

Ce score est le complémentaire du précédent en ce sens qu'il indique la proportion des fausses alertes (b) au sein de l'ensemble des dépassements prévus (a + b). La valeur idéale de ce critère est 0, correspondant au cas où il n'y a eu aucune fausse alerte (b = 0).

c) *L'indice de succès critique (CSI)*

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}$$

Ce score résume l'information en représentant l'ensemble des succès (a) par rapport à ce qui a été prévu (a+b) et à ce qui aurait dû être prévu (c). La valeur idéale de ce critère est 1, correspondant au cas où aucune fausse alerte et aucune alerte manquée n'a eu lieu (b = c = 0).

### Critères d'évaluation évènementiels

Les résultats sont également analysés à l'échelle évènementielle. Une sélection des douze plus forts évènements de débits est réalisée et pour chacun de ces évènements, on calcule différents critères de performance (présentés dans les paragraphes suivants) évalués sur la prévision faite à chaque pas de temps de l'évènement pour l'horizon de calage.

#### Le critère KGE

Le critère de Kling-Gupta KGE (Gupta et al., 2009) (adimensionnel) est défini par l'équation suivante et combine l'évaluation de la corrélation entre les débits prévus et observés, du rapport des écarts types et du biais du modèle.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

où :

- r est la corrélation linéaire entre le débit prévu et le débit observé sur l'évènement
- $\alpha$  est le rapport des écarts types des débits prévus et des débits observés sur l'évènement

- $\beta$  est le rapport du débit moyen prévu et du débit moyen observé sur l'évènement

Le KGE varie entre  $-\infty$  et 1, sa valeur optimale étant 1.

#### Le décalage en amplitude des débits de pointe

Le décalage en amplitude des débits de pointe (adimensionnel) permet d'évaluer les potentiels problèmes de représentation du maximum prévu sur l'évènement. On définit ce décalage dQP comme suit :

$$dQP = \frac{QP - QO}{QO}$$

où :

- QP : débit de pointe prévu
- QO : débit de pointe observé

Ce décalage varie entre -1 et  $+\infty$ . Des valeurs positives indiquent que, sur l'évènement, le modèle surestime le débit de pointe ; des valeurs négatives, à l'inverse, indiquent une sous-estimation du débit de pointe. La valeur optimale est 0, indiquant que le débit de pointe prévu est égal à l'observé.

#### Le décalage en temporel des débits de pointe

Le décalage temporel des débits de pointe (en pas de temps) permet d'évaluer les potentiels problèmes de retard ou d'avance du débit maximum prévu par le modèle. On définit ce décalage dTP comme suit :

$$dTP = \frac{tQP - tQO}{tQO}$$

où :

- tQP : date du débit de pointe prévu
- tQO : date du débit de pointe observé

Ce décalage varie en théorie entre  $-\infty$  et  $+\infty$ , mais en pratique est borné en valeur absolue par la durée de l'évènement considéré. Des valeurs positives indiquent que, sur l'évènement, le modèle prévoit le débit de pointe en avance de dTP pas de temps ; des valeurs négatives, à l'inverse, indiquent un retard du modèle de dTP pas de temps. La valeur optimale est 0, indiquant que les débits de pointe prévu et observé sont synchrones.

#### Le biais

Nous évaluons le biais VE du modèle sur l'évènement par la formule suivante :

$$VE = \frac{\text{moyP} - \text{moyO}}{\text{moyO}} (-)$$

où :

- moyP est le débit moyen prévu sur l'évènement
- moyO est le débit moyen observé sur l'évènement

Le biais varie entre -1 et  $+\infty$ . Le modèle est considéré comme parfait sur l'évènement si son biais est nul, c'est-à-dire si moyP = moyO. Les valeurs positives indiquent qu'en moyenne, sur l'évènement, le modèle surestime les débits ; des valeurs négatives, à l'inverse, indiquent une sous-estimation des débits.

## Résultats

### Paramétrage du modèle GRP

#### Choix du pas de temps

Le choix du pas de temps est contraint par le pas de temps des données de précipitations. En effet, le modèle peut agréger des données à pas de temps fin vers un pas de temps plus large mais ne peut pas discrétiser une donnée à pas de temps large vers un pas de temps plus fin. Le pas de temps le plus fin utilisable est donc le pas de temps 15 minutes, pas de temps des précipitations ANTILOPE utilisées pour le calage du modèle. Dans cette étude, il a été décidé de caler les modèles au pas de temps 1h.

#### Choix des horizons de calage

L'horizon de calage choisi ici correspond au temps de réaction des bassins. Ce temps de réaction a été estimé par une méthode de corrélation croisée. Pour chaque pas de temps, GRP dispose d'une gamme d'horizons d'évaluation possibles et les temps de réaction estimés ne correspondent pas toujours à ces horizons d'évaluation possibles. Dans ce cas, l'horizon d'évaluation possible le plus proche du temps de réaction estimé a été retenu. Toutefois, si le temps de réaction estimé est inférieur au pas de temps du modèle, l'horizon de calage sera fixé au premier horizon disponible. Le Tableau 5 présente les horizons de calage finalement retenus pour le modèle au pas de temps horaire.

#### Choix des seuils de calage

Différents seuils de calage ont été testés pour évaluer la sensibilité des performances du modèle.

- CVH : seuils mentionnés dans le Tableau 5,
- Seuil nul :  $0 \text{ m}^3/\text{s}$
- Débits caractéristiques : Q10, Q25, Q50, Q90 et Q95

Pour les seuils Q90 et Q95, les valeurs retenues étaient trop importantes pour les bassins Langevin – La Passerelle (40010002) et Durand – Vélodrome (40320001) pour respecter le seuil de 500 valeurs au-dessus du seuil de calage sur chaque sous-période de calage. Ils ont donc été abaissés respectivement à  $2,06 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### Choix des seuils de vigilance

Comme pour les seuils de calage, la CVH a fourni des seuils de vigilance appelés « seuils jaunes ». Ces seuils correspondent à un niveau de vigilance rarement atteint et ne peuvent donc pas être utilisés pour valider le modèle. En effet, un nombre minimum de 20 données au-dessus du seuil de vigilance est nécessaire pour évaluer le modèle et produire les fiches performances. Pour l'évaluation du calage des bassins versants, le seuil de vigilance a été choisi comme la valeur du « seuil jaune » divisée par 2. Lorsque celui-ci était trop élevé, nous avons fixé arbitrairement une valeur pour prendre en compte une dizaine d'évènements.

Comme pour le seuil de calage, plusieurs seuils de vigilance ont été testés :

- CVH : seuils mentionnés dans le Tableau 5,
- Débit caractéristique : Q95

Des tests ont été réalisés avec un seuil de vigilance égal au débit caractéristique Q99.9 mais pour l'ensemble des bassins, le nombre de données supérieures au seuil de vigilance était trop bas pour évaluer le modèle et tracer les fiches performances.

Le Tableau 5 donne les seuils retenus pour le calage du modèle ainsi que le nombre de données supérieures à ce seuil (entre parenthèses) utilisées pour la validation du modèle.

Tableau 5 : Caractéristiques des différents calages du modèle GRP effectués au pas de temps horaire, avec les horizons et seuil de calage et le seuil de vigilance utilisé pour l'évaluation (entre parenthèse, le nombre de données supérieures au seuil)

Code station	Nom de la station	Horizon de calage (h)	Seuil de calage (m <sup>3</sup> /s)	Seuil de vigilance (m <sup>3</sup> /s)
40010002	Langevin - La Passerelle	1	1	25 (96)
40120001	Marsouins – Bethleem	1	1	21,5 (1957)
40130002	Roches – Bassin La Paix	1	1	25 (1657)
40220001	Mat – Barrage	1	2	400 (22)
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	1	5	28,5 (108)
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	1	1	65 (160)
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	1	1	16,5 (48)
40310001	Pluies – Domenjod	1	4	40 (84)
40320001	Durand – Velodrome	1	0	7 (54)
40320002	Butor – Bowling	1	2	40 (25)
40320004	Saint-Denis – Amont	1	1	2,5 (1245)
40400001	Galets – Barrage	1	2	50 (103)
40510001	St Gilles – RN1A	3h	0	10,38 (110)
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	3	0,01	0,50 (80)

### Calage final et analyse multicritères expertisée de l'adéquation du modèle

Une fois le calage complet effectué, la configuration retenue a été comparée au calage effectué par la CVH qui avait retenu la configuration RNA et un seuil de calage nul pour l'ensemble des bassins. Dans le Tableau 6, la première ligne de chaque station correspond au calage complet effectué avec le choix retenu suite à l'analyse de sensibilité sur les options de calage. La seconde ligne correspond aux résultats obtenus avec la configuration retenue par la CVH.

Dans le Tableau 6, on peut voir que l'efficacité calculée est très bonne pour la plupart des bassins. Elle est comprise entre 0,465 pour le bassin 40300004 et 0,824 pour le bassin 40320002. Treize des quatorze bassins ont une efficacité supérieure à 0,61. Cela signifie que les modèles sont meilleurs que la simple persistance du dernier débit observé.

Les probabilités de détection sont bonnes également, comprises entre 38,1% pour le bassin 40300003 et 100% pour le bassin 40620003. Pour douze des quatorze bassins étudiés, la probabilité de détection est supérieure à 50%.

Le taux de fausses alertes reste assez faible, généralement inférieur à 30% hormis pour les bassins 40620003 (60,9%) et 40320004 (58,1%), 40120001 (48,2%) et 40130002 (45,2%). Enfin, l'indice de succès critique est globalement assez faible (autour de 40%).

On observe une bonne stabilité du jeu de paramètres entre le calage complet et le calage sur les deux sous-périodes. Lorsque des différences entre les jeux de paramètres de chaque sous-période ont été observées lors de la phase de calage-contrôle, en raison d'hétérogénéité des événements majeurs entre les deux sous-périodes, le jeu de paramètres obtenu lors du calage complet se rapproche du paramétrage de la sous-période contenant les événements majeurs.

Tableau 6 : Comparaison de deux modalités de calage complet. Pour un bassin donné, la première ligne correspond à la configuration issue de l'analyse de sensibilité des options de calage, la seconde ligne correspond à la configuration retenue par la CVH. Pour les deux configurations testées, les valeurs en vert correspondent au meilleur résultat, celles en rouge correspondent au moins bon résultat. Lorsque deux valeurs sont identiques, elles sont en rouge. La ligne en gras indique la configuration finalement retenue pour le calage complet.

Code station	Nom station	Config.	Eff (-)	ROUT (mm)	CORR (-)	TB (h)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Qcal (m <sup>3</sup> /s)	Qvig (m <sup>3</sup> /s)
<b>40010002</b>	Langevin - La	<b>RNA</b>	<b>0,763</b>	<b>155,46</b>	<b>0,29</b>	<b>2</b>	<b>58,8</b>	<b>28,6</b>	<b>47,6</b>	<b>0,7</b>	<b>25</b>
40010002	Passerelle	RNA	0,762	156,16	0,29	2	58,8	28,6	47,6	0	25
<b>40120001</b>	Marsouins –	<b>RNA</b>	<b>0,662</b>	<b>307,66</b>	<b>0,78</b>	<b>2,46</b>	<b>52,2</b>	<b>48,2</b>	<b>35,1</b>	<b>1</b>	<b>21,5</b>
40120001	Bethleem	RNA	0,662	307,66	0,78	2,46	52,2	48,2	35,1	0	21,5
<b>40130002</b>	Roches –	<b>RNA</b>	<b>0,707</b>	<b>117,8</b>	<b>1</b>	<b>2,46</b>	<b>58,3</b>	<b>45,2</b>	<b>39,4</b>	<b>0,88</b>	<b>25</b>
40130002	Bassin La Paix	RNA	0,708	117,8	1	2,46	57,2	45,7	38,6	0	25
<b>40220001</b>	Mat –	<b>RNA</b>	<b>0,714</b>	<b>113,18</b>	<b>0,43</b>	<b>2,46</b>	<b>50</b>	<b>16,7</b>	<b>45,5</b>	<b>4,12</b>	<b>400</b>
40220001	Barrage	RNA	0,707	113,18	0,43	2,46	50	16,7	45,5	0	400
40300001	Grande Saint-	RNA	0,671	45,11	0,55	2,93	44,2	29,6	37,3	0,3	28,5
<b>40300001</b>	Jean –	<b>RNA</b>	<b>0,667</b>	<b>45,11</b>	<b>0,55</b>	<b>2,93</b>	<b>46,5</b>	<b>28,6</b>	<b>39,2</b>	<b>0</b>	<b>28,5</b>
40300003	Petite Saint-	RNA	0,773	29,05	0,43	2,46	38,1	11,1	36,4	1	16,5
40300003	Jean – Delice	RNA	0,755	38,44	0,43	2,46	33,3	12,5	31,8	0	16,5
<b>40300004</b>	Sainte-	<b>RNA</b>	<b>0,465</b>	<b>175,74</b>	<b>0,98</b>	<b>2,93</b>	<b>48,9</b>	<b>26,7</b>	<b>41,5</b>	<b>0</b>	<b>65</b>
40300004	Suzanne –	RNA	0,465	175,74	0,98	2,93	48,9	26,7	41,5	0	65
<b>40310001</b>	Pluies –	<b>TAN</b>	<b>0,618</b>	<b>17,27</b>	<b>0,34</b>	<b>2,46</b>	<b>48,3</b>	<b>22,2</b>	<b>42,4</b>	<b>0,08</b>	<b>40</b>
40310001	Domenjod	RNA	0,642	61,54	0,36	2,03	41,4	25	36,4	0	40
40320001	Durand –	TAN	0,472	22,85	0,31	2,22	83,3	44,4	50	0	7
<b>40320001</b>	Velodrome	<b>RNA</b>	<b>0,612</b>	<b>54,58</b>	<b>0,33</b>	<b>2,03</b>	<b>83,3</b>	<b>28,6</b>	<b>62,5</b>	<b>0</b>	<b>7</b>
<b>40320002</b>	Butor –	<b>RNA</b>	<b>0,824</b>	<b>40</b>	<b>0,65</b>	<b>1,94</b>	<b>81,8</b>	<b>10</b>	<b>75</b>	<b>2</b>	<b>40</b>
40320002	Bowling	RNA	0,814	41,64	0,65	1,94	81,8	10	75	0	40
40320004	Saint-Denis –	RNA	0,712	190,38	0,49	2,46	60,2	56,5	33,8	0,7	2,5
<b>40320004</b>	Amont	<b>RNA</b>	<b>0,715</b>	<b>190,38</b>	<b>0,49</b>	<b>2,46</b>	<b>65,1</b>	<b>58,1</b>	<b>34,2</b>	<b>0</b>	<b>2,5</b>
<b>40400001</b>	Galets –	<b>RNA</b>	<b>0,68</b>	<b>108,74</b>	<b>0,33</b>	<b>2,46</b>	<b>75</b>	<b>20</b>	<b>63,2</b>	<b>0,38</b>	<b>50</b>
40400001	Barrage	RNA	0,679	108,74	0,33	2,46	75	20	63,2	0	50
<b>40510001</b>	Ravine St	<b>RNA</b>	<b>0,753</b>	<b>123,95</b>	<b>0,5</b>	<b>4,54</b>	<b>59,3</b>	<b>15,8</b>	<b>53,3</b>	<b>0</b>	<b>10,4</b>
	Gilles – RN1A										
<b>Non calé par la CVH</b>											
<b>40620003</b>	Blanche – ZI1	<b>RNA</b>	<b>0,794</b>	<b>19,45</b>	<b>0,08</b>	<b>3,96</b>	<b>100</b>	<b>60,9</b>	<b>39,1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>
<b>40620003</b>	Abattoir	<b>RNA</b>	<b>0,793</b>	<b>19,45</b>	<b>0,08</b>	<b>3,96</b>	<b>100</b>	<b>60,9</b>	<b>39,1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>

#### Résultats détaillés sur la Ravine St Gilles (40510001 — RN1A)

Le modèle GRP à St Gilles – RN1A (40510001) est calé selon les choix suivants :

- Période : 01/12/2003 - 31/12/2019. La première année est utilisée pour la mise en route du modèle.
- Configuration : RNA
- Horizon de calage : 3 h
- Seuil de calage : 0 m<sup>3</sup>/s

- Seuil de vigilance : 10,38 m<sup>3</sup>/s

Les performances (Tableau 7) sont moyennes à bonnes en fonction des seuils considérés. Sur le seuil de vigilance retenu, on trouve un bon compromis entre probabilité de détection et fausses alertes, mais les performances sont calculées sur un nombre limité de pas de temps.

Tableau 7 : Scores de performance du modèle GRP à St Gilles – RN1A (40510001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,19	0,627	33	57,8	22,7	13778
Q90	0,30	0,638	23,2	65,6	16,1	5594
Q95	0,39	0,644	33,1	73,5	17,2	2681
Qvig retenu	10,38	0,731	59,3	15,8	53,3	110
Q99,9	17,96	0,778	28,6	84,6	11,1	54

Les prévisions réalisées sur quatre événements de crue importants (Figure 4) montrent une tendance à sous-estimer la pointe de crue. Cette difficulté peut avoir diverses origines : problèmes du modèle lui-même, sous-estimation des pluies, surestimation des débits observés.

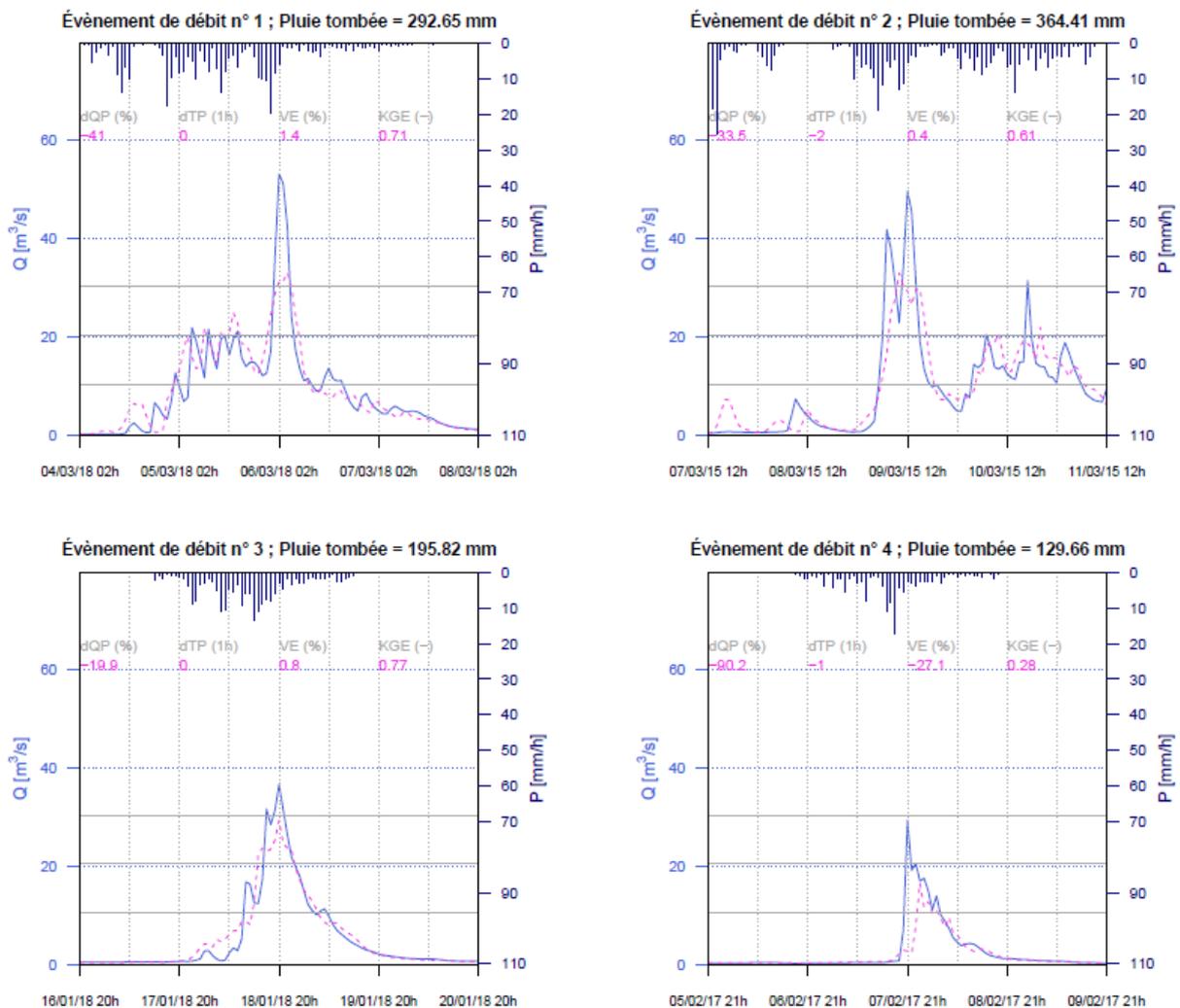


Figure 4 : Prévisions du modèle GRP à St Gilles – RN1A (40510001) lors des évènements de 03/2018, 03/2015, 01/2018 et 02/2017

## Discussion

L'étude de Viatgé (2019) constituait la première analyse du modèle GRP appliqué aux bassins réunionnais. Elle avait mis en évidence des problèmes dans les données d'entrée qui ont été corrigés. La reprise des courbes de tarage par la CVH a permis d'accorder une plus grande confiance aux données de débits utilisées. Par ailleurs, l'utilisation de la lame d'eau ANTILOPE, jugée plus fiable que la lame d'eau PANTHERE utilisée dans l'étude de Viatgé (2019), permet de mieux ajuster les bilans en eau des bassins étudiés. Dans cette étude, nous avons cherché à mettre en place le modèle GRP sur quatorze bassins versants sélectionnés par la CVH.

Le Tableau 8 recense pour chaque bassin le bilan des performances obtenues avec le modèle GRP. Nous y avons rappelé les scores calculés lors de l'étude de 2019 pour comparaison. Pour chaque bassin, les performances de GRP avec utilisation des postes pluviométriques sont indiquées en roses ; celles avec utilisation des données radars PANTHERE sont indiquées en vert ; celles avec les résultats de l'étude de 2020 utilisant les données radars ANTILOPE en rouge. Dans la dernière colonne, nous avons repris les observations de l'étude de 2019 et les avons complétées avec les conclusions de l'étude de 2020 pour indiquer si nous jugeons le modèle applicable au bassin. Le code couleur donne les informations suivantes : rouge indique que le modèle ne paraît pas applicable, orange que le modèle donne des performances moyennes, vert qu'il paraît applicable en opérationnel.

Les résultats produits dans cette étude sont particulièrement bons par rapport à l'étude de Viatgé (2019). Toutefois, il convient de préciser que le seuil de vigilance utilisé pour calculer les performances du modèle est très différent de celui utilisé par Viatgé. Une comparaison a été réalisée en considérant les seuils de vigilance utilisés par Viatgé. A seuils de vigilance identiques, les performances sont généralement meilleures avec les données ANTILOPE (efficacité, probabilité de détection, indice de succès critique). Toutefois, le taux de fausses alertes est particulièrement élevé pour la majorité des bassins étudiés, rejoignant les résultats de l'étude de Viatgé.

Globalement, le modèle GRP parvient à reproduire les événements de crue observés sur les bassins sélectionnés. Toutefois, une tendance à la sous-estimation des pics de crue les plus importants est observée pour la plupart des bassins. Des travaux sont actuellement en cours dans l'équipe HYDRO d'INRAE Antony pour améliorer la réactivité du modèle aux forts signaux en travaillant notamment sur les capacités du réservoir de production. Les résultats de ces travaux alimenteront le modèle GRP dans les années à venir et permettront probablement de pallier à ce problème.

Tableau 8 : Bilan des performances du modèle GRP sur chacun des bassins étudiés.

Les lignes roses représentent les résultats obtenus avec le forçage du modèle par les postes pluviométriques (2019); les lignes vertes, avec le forçage par les données radars PANTHERE (2019) et les lignes rouges avec le forçage par les données radars ANTILOPE (2020). Dans la dernière colonne, un code couleur est utilisé pour traduire l'applicabilité du modèle sur le bassin : rouge signifie que le modèle ne paraît pas applicable, à l'inverse du vert, orange indique que le modèle pourrait être applicable avec des ajustements. Dans cette colonne, la première ligne correspond aux conclusions de l'étude de Viatgé (2019) et la seconde ligne correspond aux conclusions de l'étude réalisée en 2020.

Code station	Nom de la station	Surface (km <sup>2</sup> )	Efficacité (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Qvig (m <sup>3</sup> /s)	Evaluation du modèle GRP
40010002	Langevin - La Passerelle	36,78	-0,551	56,2	98,2	1,8	1,38	Les performances du modèle sont jugées mauvaises sur ce bassin. En effet, le modèle de persistance apparaît meilleur que le modèle GRP utilisé avec les postes pluviométriques. Les données radars semblent donner de meilleurs résultats mais les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés et l'indice de succès critique particulièrement bas.
			0,145	43,8	94,1	5,4		
			0,763	58,8	28,6	47,6	25	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les événements de crue avec une tendance à la sous-estimation pour les très hauts débits.
40120001	Marsouins - Bethleem)	81,66	0,411	15,7	41,6	14,1	7,46	Les performances du modèle sont moyennes sur ce bassin. Le critère de persistance est moyen, les taux de fausses alertes sont trop élevés et les probabilités de détection et indice de succès critique trop faibles.
			0,554	13,2	42,1	12,1		
			0,662	52,2	48,2	35,1	21,5	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le taux de fausses alertes est cependant assez élevé.
40130002	Roches - Bassin La Paix	28,64	0,415	44,2	63,3	25,1	2,87	Les performances sur ce bassin sont jugées satisfaisantes. Avec les données radars en particulier, le critère de persistance est bon. Les critères de dépassement de seuils ne sont pas complètement satisfaisants. Le modèle nous paraît plus intéressant à exploiter avec les données radars.
			0,607	39,7	54,9	26,8		
			0,707	58,3	45,2	39,4	25	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le taux de fausses alertes est cependant assez élevé. Légère tendance à la sous-estimation pour les très hauts débits.
40220001	Mat - Barrage	145,64	0,526	41,2	39,7	32,4	7,9	Les performances du modèle sur ce bassin sont jugées satisfaisantes : les critères de persistance sont bons. Néanmoins les critères de dépassement de seuils ne sont pas complètement satisfaisants.
			0,7	29,3	33,3	25,6		
			0,714	50	16,7	45,5	400	Les performances du modèle sont très satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les événements de crue. Sous-estimation des débits très importants (> à 750 m <sup>3</sup> /s).
40300001	Grande Saint-Jean - RN2002	23,15	0,478	34,8	49,9	25,8	6,24	Les performances sur ce bassin sont jugées satisfaisantes. Avec les données radars en particulier, le critère de persistance est bon. Les critères de dépassement de seuils ne sont pas complètement satisfaisants. Le modèle nous paraît plus intéressant à exploiter avec les données radars.
			0,75	35,9	42,9	28,3		

Code station	Nom de la station	Surface (km <sup>2</sup> )	Efficacité (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Qvig (m <sup>3</sup> /s)	Evaluation du modèle GRP
			0,667	46,5	28,6	39,2	28,5	Les performances du modèle sont assez satisfaisantes. La probabilité de détection est assez faible. Le modèle réagit bien aux épisodes pluvieux majeurs mais il sous-estime de manière parfois importante les pointes de crue.
40300003	Petite Saint-Jean - Delice	9,52	0,224	36,8	80	14,9	1,11	Les performances du modèle sont jugées moyennes sur ce bassin.
			0,585	28,9	72,5	16,4		En effet, le critère de persistance est assez moyen et les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés.
			0,773	38,1	11,1	36,4	16,5	Les performances du modèle sont jugées moyennes. La probabilité de détection est assez faible et le modèle sous-estime de manière importante les événements majeurs de crue.
40310001	Pluies - Domenjod	39,16	0,221	45,6	82	14,8	0,75	Les performances du modèle sont jugées moyennes sur ce bassin.
			0,48	36	74,9	17,4		En effet, le critère de persistance est assez moyen et les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés. Le problème détecté sur la courbe de tarage en 2014 peut potentiellement expliquer ces difficultés.
			0,618	48,3	22,2	42,4	40	Les performances du modèle sont satisfaisantes même si la probabilité de détection est assez faible. Le modèle reproduit bien les événements de crue.
40320001	Durand - Velodrome	12,81	0,36	41,5	91,9	7,2	0,09	Les performances du modèle sont jugées moyennes sur ce bassin.
			0,45	46,2	89,3	9,5		En effet, le critère de persistance est assez moyen et les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés. Comme indiqué plus haut, la trop mauvaise qualité des données de basses eaux peut expliquer les performances moyennes du modèle sur ce bassin. Le modèle nous parait plus intéressant à exploiter avec les données radars.
			0,612	83,3	28,6	62,5	7	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les événements de crue malgré le caractère intermittent de la ravine. Il a toutefois tendance à sous-estimer les forts débits (> à 40 m <sup>3</sup> /s)
40320002	Butor - Bowling	16,86	0,006	16	66,3	12,2	0,3	Les performances du modèle sont jugées moyennes sur ce bassin.
			0,516	16,5	64,9	12,6		En effet, le critère de persistance est assez moyen et les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés. Comme indiqué plus haut, la trop mauvaise qualité des données de basses eaux peut expliquer les performances moyennes du modèle sur ce bassin. Le modèle nous parait plus intéressant à exploiter avec les données radars et totalement inexploitable avec les postes pluviométriques.
			0,824	81,8	10	75	40	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les événements de crue. Sous-estimation pour les très hauts débits (> à 100 m <sup>3</sup> /s)
40320004		27,01	0,274	35,6	63,2	22,1	0,8	

Code station	Nom de la station	Surface (km <sup>2</sup> )	Efficacité (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Qvig (m <sup>3</sup> /s)	Evaluation du modèle GRP
	Saint-Denis - Amont		0,576	38,9	75,3	17,8		Les performances sur ce bassin sont jugées satisfaisantes. Avec les données radars en particulier, le critère de persistance est bon. Néanmoins, les critères de dépassement de seuils sont assez décevants.
			0,715	65,1	58,1	34,2	2,5	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle réagit très bien aux événements pluvieux importants. Le taux de fausses alertes est toutefois assez élevé.
40400001	Galets - Barrage	68,29	0,274	26,2	63	18,1	1,6	Les performances sur ce bassin sont jugées satisfaisantes. Avec les données radars en particulier, le critère de persistance est bon. Néanmoins, les critères de dépassement de seuils sont assez décevants.
			0,555	15,4	74,4	10,6		
			0,68	75	20	63,2	50	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les événements de crue avec une tendance à la sous-estimation pour les très hauts débits (> à 175 m <sup>3</sup> /s).
40300004	Ste Suzanne - Niagara	23,53	0,465	48,9	26,7	41,5	65	Les performances du modèle sont moyennes. Le modèle a tendance à surestimer les débits de pointe. L'efficacité n'est pas terrible mais les critères de dépassement de seuils sont corrects.
40620003	Ravine Blanche - ZI1 Abattoir	36,54	0,793	100	60,9	39,1	2	Les performances sont très mauvaises pour ce bassin en dépit d'une efficacité élevée. Le modèle ne parvient pas à représenter correctement le fonctionnement de cette ravine. Le modèle tord ses paramètres pour parvenir à reproduire le caractère intermittent de la ravine. Le paramètre CORR est inférieur à 0,1. Différentes pistes d'explication fournies par la CVH : forte capacité d'infiltration au sein du bassin versant de la planèze Tampon/St-Pierre et pluies essentiellement concentrées en amont du bassin versant (Plaine des Cafres / hauts du Tampon).
40510001	Ravine St-Gilles Pont RN1A	30,29	0,739	59,3	15,8	53,3	10,38	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle réagit bien aux événements de pluie importants avec une tendance à la sous-estimation sur les très forts débits (supérieurs à 40 m <sup>3</sup> /s).

Ainsi, il apparaît que GRP donne des performances satisfaisantes pour onze des quatorze bassins étudiés :

- Langevin – La Passerelle (40010002),
- Marsouins – Bethléem (40120001),
- Roches – Bassin la Paix (40130002),
- Mât – Barrage (40220001),
- Grande rivière Saint-Jean – RN2002 (40300001),
- Pluies – Domenjod (40310001),
- Durand – Vélodrome (40320001),
- Butor – Bowling (40320002),
- Saint-Denis – Amont (40320004),
- Galets – Barrage (40400001),
- Saint Gilles – Pont RN1A (40510001).

Pour deux bassins, les performances sont jugées moyennes :

- Petite Saint-Jean – Délice (40300003),
- Ste Suzanne – Niagara (40300004).

Pour un bassin, nous le jugeons inexploitable du fait de performances particulièrement mauvaises qui peuvent en partie s'expliquer par le caractère intermittent de cette ravine :

- Blanche - ZI1 Abattoir (40620003)

Suite à la mise en place opérationnelle de ces quatorze bassins versants, un retour d'expérience a été mené par la CVH en 2022 pour évaluer le modèle GRP en réalisant des rejeux des événements les plus importants depuis cette mise en place opérationnelle.

## Conclusion

Les travaux se sont concentrés sur l'évaluation d'un modèle hydrologique de prévision des crues, GRP, qui est à la fois simple et robuste, pour réaliser des prévisions à vocation opérationnelle sur les bassins versants de la Réunion.

Suite à l'étude menée par Viatgé (2019) qui incluait une critique des données alimentant le modèle de prévision GRP, un certain nombre de difficultés dans les données de débits brutes avaient été détectées. Après mise à jour des courbes de tarage par la CVH, un nouvel exercice de calage a pu être réalisé sur quatorze bassins versants réunionnais pour la mise en place opérationnelle du modèle.

L'utilisation des données radar ANTILOPE au pas de temps 15 minutes sur une période comprise entre 12/2013 et 01/2020 a permis de fiabiliser l'information pluviométrique. Le modèle a été calé aux pas de temps 15 minutes et horaire entre le 01/12/2013 et le 31/12/2019 pour s'adapter à la disponibilité des données. Différents tests de sensibilité ont été réalisés sur les options de calage du modèle (configuration de correction des erreurs, seuil de calage, seuil de vigilance) pour évaluer le modèle et convenir d'une configuration optimale. La configuration utilisant le réseau de neurones artificiels (RNA) a fourni de meilleurs résultats que la correction autorégressive (TAN). Le choix des seuils de calage a reposé sur une

comparaison des performances pour les différents seuils de calage testés. De manière générale, l'efficacité du modèle, les probabilités de détection et les indices de succès critique sont bons pour la quasi-totalité des bassins évalués. Les très hauts débits sont généralement sous-estimés par le modèle qui réagit bien mais qui n'arrive pas à reproduire les événements extrêmes. Parmi les quatorze bassins, les performances ont été jugées satisfaisantes pour onze bassins, moyennes pour deux bassins et mauvaises pour un bassin. Sur le bassin de la ravine Saint Gilles, cas d'étude spécifique du projet, les résultats sont intéressants et ouvrent des perspectives opérationnelles.

## Perspectives opérationnelles

Un travail de mise en place du modèle GRP a été mené avec la CVH. Une fois la configuration optimale du modèle GRP identifiée pour chaque bassin, la base de données Temps Réel a pu être créée et mise en place sur un serveur alimenté en temps réel par les données observées (pluie ANTILOPE et débit) et prévues (pluie AROME).

Un certain nombre d'outils ont été mis à disposition de la CVH pour valider les données alimentant le modèle en temps réel et s'assurer que le modèle utilise au mieux l'information disponible.

Les premiers retours opérationnels de la CVH (Baby et al., 2023) indiquent que les prévisions de GRP sont une source d'information utile pour la CVH pour l'anticipation opérationnelle des crues. Le passage à une version plus récente de GRP devrait être source d'améliorations. Le test expérimental d'une version plus réactive aux intensités de pluie devrait également être source d'amélioration des prévisions (Astagneau et al., 2022).

## Références

- Astagneau P. C., Bourgin F., Andréassian V., Perrin C. 2022. Catchment response to intense rainfall: evaluating modeling hypotheses, *Hydrological Processes Journal*, 36(8), e14676, <https://doi.org/10.1002/hyp.14676>
- Baby, F., Boujard, P., Martel, S., Roulenq, A., Villani, D., Organde, D., Javelle, P., Tilmant, F., Perrin, C., 2023. Préviation des crues en milieu montagneux sous climat tropical : exemple de la Réunion. Conférence SHF "Préviation des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives", Toulouse, 28-30 novembre 2023.
- Berthet, L., 2010. Préviation des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), Paris, 603 pp.
- Bildstein, A., 2017. Tests exploratoires pour la mise en place de prévisions opérationnelles des crues sur l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'étude, ENTPE Lyon, Irstea, Antony, 59 pp.
- Dariento, M., 2021. Détection et estimation de détarages dans les modèles hauteur-débit pour la quantification du débit des cours d'eau en rétrospectif et en temps réel. Thèse de Doctorat, INRAE (Lyon), Université Grenoble Alpes, Grenoble, sous presse
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., et Martinez, G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377, 80–91, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003, 2009.
- Klemeš, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models." *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques* 31(1): 13-24.
- Michel, C.: Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Tech. rep., Cemagref, Antony, 320 p., in French, 1991.
- Paluszkiwicz, M., 2019. Applicabilité de la méthode AIGA sur l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'études, ENGEES, Irstea, Antony, 82 pp.
- Pohl, B., Morel, B., Barthe, C., Bousquet, O., 2016. *Monthly Weather Review* 144, 11; 10.1175/MWR-D-15-0404.1, American Meteorological Society
- Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de préviation de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, Cemagref Antony, EPHE, Paris, 374 pp.
- Tilmant F. 2021. Mise en place opérationnelle du modèle de préviation des crues GRP sur des bassins réunionnais. Convention SNRH-INRAE, INRAE UR HYCAR.2021.
- Viatgé, J., Pinna, T., Ficchi, A., Perrin, C., Dorchies, D., Garandeau, L., Tilmant, F., 2019. Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de préviation des crues GRP. *La Houille Blanche* (2), pp. 72-80.
- Viatgé, J., Perrin, C., 2019. Amélioration des capacités de préviation de la CVH Réunion. Évaluation du modèle de préviation des crues GRP au contexte réunionnais. Rapport d'étude, Irstea, Antony, 47 pp.