



**HAL**  
open science

# Mise en place opérationnelle du modèle de prévision des crues GRP sur des bassins réunionnais

François Tilmant

► **To cite this version:**

François Tilmant. Mise en place opérationnelle du modèle de prévision des crues GRP sur des bassins réunionnais. INRAE UR HYCAR. 2021. hal-03836753

**HAL Id: hal-03836753**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03836753>**

Submitted on 2 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère chargé de l'environnement, de l'énergie et de la mer  
par décision de subvention n°2102615443*

# AMÉLIORATION DES CAPACITÉS DE PRÉVISION DE LA CVH RÉUNION

*Mise en place opérationnelle du modèle de  
prévision des crues GRP sur des bassins  
réunionnais*

JUILLET 2021

**François TILMANT**

INRAE - Centre d'Île-de-France – Jouy-en-Josas –  
Antony

UR HYCAR – Hydrosystèmes continentaux  
anthropisés - Ressources, risques, restauration  
1, rue Pierre-Gilles de Gennes  
CS 10030

92761 Antony Cedex

Tel : 01 40 96 61 21

Fax : 01 40 96 61 99

[www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



## Table des matières

Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	5
Introduction .....	7
1. Contexte de l'étude .....	8
1.1. Géomorphologie de l'île de La Réunion .....	8
1.2. Contexte climatique.....	8
1.3. Expériences de modélisation hydrologique des bassins réunionnais .....	11
1.3.1. Le modèle de simulation GR4H.....	11
1.3.2. La méthode AIGA.....	12
1.3.3. Le modèle de prévision GRP .....	12
2. Données.....	13
2.1. Bassins versants étudiés .....	13
2.2. Données hydrométriques .....	14
2.3. Données météorologiques.....	15
2.3.1. Précipitations .....	15
2.3.2. Evapotranspiration potentielle .....	16
3. Modèle et méthode d'analyse.....	18
3.1. Le modèle de prévision des crues GRP .....	18
3.2. Calage du modèle et méthode d'évaluation.....	20
3.2.1. Méthode de calage « pas-à-pas » .....	20
3.2.2. Seuil de calage et horizon de calage .....	20
3.2.3. Méthode d'évaluation du modèle .....	21
3.3. Critères d'évaluation numériques continus.....	21
3.3.1. Erreur quadratique moyenne RMSE .....	21
3.3.2. Critère de persistance C2MP .....	22
3.3.3. Critères de dépassement de seuil.....	22
3.4. Critères d'évaluation évènementiels .....	23
3.4.1. Le critère KGE .....	24
3.4.2. Le décalage en amplitude des débits de pointe.....	24
3.4.3. Le décalage en temporel des débits de pointe .....	24
3.4.4. Le biais .....	25
3.5. Options de calage .....	25
3.5.1. Pas de temps du modèle.....	25

3.5.2.	Choix de la configuration de calage .....	25
3.5.3.	Référentiel temporel.....	25
3.5.4.	Seuil et horizon de calage .....	25
3.5.5.	Période de calage.....	26
3.5.6.	Seuil de vigilance.....	26
4.	Résultats .....	26
4.1.	Données d'entrée .....	26
4.1.1.	Analyse critique des données .....	26
4.1.2.	Caractérisation hydrologique des bassins.....	27
4.1.3.	Constitution de la base de données historiques .....	32
4.2.	Paramétrage du modèle GRP.....	32
4.2.1.	Choix du pas de temps.....	32
4.2.2.	Choix des horizons de calage .....	33
4.2.3.	Choix des seuils.....	33
4.2.4.	Intérêt du module neige .....	34
4.2.5.	Méthode d'assimilation .....	34
4.3.	Résultats des tests en calage-validation et analyse .....	34
4.3.1.	Efficacité .....	35
4.3.2.	Probabilité de détection (POD) .....	35
4.3.3.	Taux de fausses alertes (FAR).....	35
4.3.4.	Indice de succès critique (CSI).....	35
4.3.5.	Robustesse des paramètres d'une sous-période à l'autre .....	35
4.3.6.	Ecart entre débits prévus et observés.....	36
4.4.	Calage final et analyse multicritères expertisée de l'adéquation du modèle .....	37
4.5.	Création de la base de données temps réel.....	53
5.	Discussion .....	53
6.	Mise en place opérationnelle de GRP.....	58
6.1.	Création de la base de données temps réel.....	58
6.2.	Paramétrage du modèle GRP.....	58
6.2.1.	Fichier Config_Prevision.txt .....	58
6.2.2.	Fichier LISTE_Bassins.DAT.....	58
6.3.	Organisation opérationnelle .....	59
6.3.1.	Mise à disposition des données de précipitations observées et prévues et de débits ..	59
6.3.2.	Stratégie de prévision .....	60

6.3.3. Outils complémentaires.....	67
Conclusion .....	68
Références.....	69

## Liste des figures

Figure 1 : Altitudes (en m) sur l'Île de la Réunion et localisation des bassins versants étudiés (contours en noir et exutoires en rouge) .....	8
Figure 2 : Pluviométrie mensuelle interannuelle sur un bassin de la côte-au-vent (bassin 40120001, en vert) et sur un bassin de la côte-sous-le-vent (bassin 40400001, en bleu) – source : données ANTILOPE 15' Météo-France .....	10
Figure 3 : Lamé d'eau mensuelle interannuelle sur un bassin de la côte-au-vent (bassin 40120001, en vert) et sur un bassin de la côte-sous-le-vent (bassin 40400001, en bleu) – source : données CVH.....	11
Figure 4 : Données disponibles par station hydrométrique sur la période 2013-2019 : un trait plein indique une donnée, un espace indique une lacune. ....	15
Figure 5 : Stations utilisées pour le calcul des ETP de bassin.....	17
Figure 6 : Données disponibles par station permettant le calcul de l'ETP : un trait plein indique une donnée, un espace indique une lacune .....	18
Figure 7 : Schéma de la structure du modèle GRP dans la version fonctionnant à différents pas de temps (Source : Viatgé et al., 2019).....	20
Figure 8 : Illustration de la procédure de calage-contrôle.....	21
Figure 9 : Données moyennes interannuelles de l'étude 2019 en fonction des données moyennes interannuelles de l'étude 2020 sur la période 01/01/2014 – 31/12/2018 .....	27
Figure 10 : Diagramme de Turc-Budyko obtenu à partir des valeurs de cumuls annuels moyens de précipitations P, débits Q et évapotranspiration potentielle E sur les périodes concomitantes entre le 01/01/2014 et le 31/12/2018 pour les données de l'étude 2019 (points orange) et de l'étude 2020 (points gris).....	28
<b>Figure 11 : Diagramme de Turc-Budyko obtenu à partir des valeurs de cumuls annuels moyens de précipitations P, débits Q et évapotranspiration potentielle E sur les périodes concomitantes entre le 01/01/2014 et le 31/12/2018 - Zomm sur les données de l'étude 2020.....</b>	<b>29</b>
Figure 12 : Prévisions du modèle GRP à Langevin - La Passerelle (40010002) lors des évènements de 01/2018, 04/2018, 03/2015 et 03/2018.....	40
Figure 13 : Prévisions du modèle GRP à Marsouins - Bethleem (40120001) lors des évènements de 12/2015, 03/2015, 04/2018 et 02/2017.....	41
Figure 14 : Prévisions du modèle GRP à Roches - Bassin La Paix (40130002) lors des évènements de 04/2015, 12/2015, 03/2015 et 08/2017.....	42
Figure 15 : Prévisions du modèle GRP à Mat - Barrage (40220001) lors des évènements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 12/2015 .....	43
Figure 16 : Prévisions du modèle GRP à Grande Saint-Jean - RN2002 (40300001) lors des évènements de 04/2018, 03/2015, 12/2016 et 04/2019.....	44
Figure 17 : Prévisions du modèle GRP à Petite Saint-Jean - Delice (40300003) lors des évènements de 04/2018, 03/2015, 08/2017 et 04/2019.....	45
Figure 18 : Prévisions du modèle GRP à Sainte-Suzanne - Niagara (40300004) lors des évènements de 03/2015, 08/2017, 02/2017 et 12/2015.....	46

Figure 19 : Prévisions du modèle GRP à Pluies - Domenjod (40310001) lors des évènements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 03/2017 .....	47
Figure 20 : Prévisions du modèle GRP à Durand - Velodrome (40320001) lors des évènements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 12/2015 .....	48
Figure 21 : Prévisions du modèle GRP à Butor - Bowling (40320002) lors des évènements de 03/2018, 03/2015, 26/01/2018 et 04/01/2018 .....	49
Figure 22 : Prévisions du modèle GRP à Saint-Denis - Amont (40320004) lors des évènements de 03/2018, 02/2017, 03/2017 et 03/2015 .....	50
Figure 23 : Prévisions du modèle GRP à Galets - Barrage (40400001) lors des évènements de 03/2018, 03/2015, 02/2017 et 02/2016 .....	51
Figure 24 : Prévisions du modèle GRP à Blanche - Z11 Abattoir (40620003) lors des évènements de 04/2018, 03/2018, 06/2018 et 12/2019 .....	52
Figure 25 : Stratégie de prévision pour le modèle GRP au pas de temps 15 minutes.....	65
Figure 26 : Stratégie de prévision pour le modèle GRP au pas de temps 1 heure .....	66

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Précipitations journalières moyennes (Mean), écart-type (SD), maximum (Max) par saison. ....	9
Tableau 2 : Caractéristiques des 13 bassins versants étudiés.....	14
Tableau 3 : Code, nom, altitude et date de mise en service des différentes stations permettant le calcul de l'ETP, disponibles sur le territoire réunionnais .....	16
Tableau 4 : Tableau de contingence. ....	23
Tableau 5 : Valeurs de cumuls annuels moyens de précipitations, débits et ETP (mm) et rapports P/E (-) et Q/P (-) associés. ....	29
Tableau 6 : 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. ....	30
Tableau 7 : Temps de réaction estimé par corrélation croisée et seuil de vigilance jaune pour les 13 bassins étudiés.....	31
Tableau 8 : 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).....	34
Tableau 9 : Valeurs des quantiles 10, 50 et 90 des paramètres de GRP calculés au pas de temps horaire pour 1000 bassins métropolitains (Source : Manuel d'utilisation de GRP) .....	36
Tableau 10 : Choix des options utilisées pour réaliser le calage complet du modèle GRP (seuil de calage et configuration) .....	37
Tableau 11 : Comparaison de deux modalités de calage complet. ....	38
Tableau 12 : Scores de performance du modèle GRP à Langevin - La Passerelle (40010002) .....	40
Tableau 13 : Scores de performance du modèle GRP à Marsouins - Bethleem (40120001) .....	41
Tableau 14 : Scores de performance du modèle GRP à Roches - Bassin La Paix (40130002) .....	42
Tableau 15 : Scores de performance du modèle GRP à Mat - Barrage (40220001) .....	43
Tableau 16 : Scores de performance du modèle GRP à Grande Saint-Jean - RN2002 (40300001).....	44
Tableau 17 : Scores de performance du modèle GRP à Petite Saint-Jean - Delice (40300003) .....	45
Tableau 18 : Scores de performance du modèle GRP à Sainte-Suzanne - Niagara (40300004).....	46
Tableau 19 : Scores de performance du modèle GRP à Pluies - Domenjod (40310001) .....	47

Tableau 20 : Scores de performance du modèle GRP à Durand - Velodrome (40320001).....	48
Tableau 21 : Scores de performance du modèle GRP à Butor - Bowling (40320002).....	49
Tableau 22 : Scores de performance du modèle GRP à Saint-Denis - Amont (40320004).....	50
Tableau 23 : Scores de performance du modèle GRP à Galets - Barrage (40400001).....	51
Tableau 24 : Scores de performance du modèle GRP à Blanche - ZI1 Abattoir (40620003).....	52
Tableau 25 : Bilan des performances du modèle GRP sur chacun des bassins étudiés. ....	55
Tableau 26 : Description des produits météo utilisés pour l'alimentation en temps réel du modèle GRP .....	59
Tableau 27 : Temps de mise à disposition des données de précipitations prévues AROME 1h .....	60
Tableau 28 : Heure de lancement des différentes tâches planifiées .....	63

## Introduction

En France métropolitaine, les Services de Prévision des Crues de l'État (SPC), coordonnés par le Service Central Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), sont en charge de la prévision des inondations et publient quotidiennement des cartes de vigilance indiquant, pour un grand nombre de cours d'eau, les risques de débordement pour les prochaines 24 h. Dans les territoires d'outre-mer, l'hydrométrie et la surveillance des cours d'eau est assurée par les Cellules de Veille Hydrologique (CVH) des Directions de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL). Ces territoires sont soumis à des contextes météorologiques parfois très éloignés du contexte métropolitain et la transposabilité des modèles de prévisions de crues n'est pas toujours évidente.

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. Diverses pistes ont été envisagées, dont l'une avec les outils développés par l'équipe d'INRAE à Antony.

Ainsi, une étude menée par INRAE Antony (Viatgé, 2019) a eu pour objectif d'évaluer la pertinence de la mise en place du modèle de prévision des crues GRP (Génie Rural pour la Prévision des crues, Tangara, 2005, Berthet, 2010, Viatgé et *al.*, 2019) sur les bassins réunionnais. Suite à cette étude, il a été décidé de poursuivre ces travaux d'évaluation et de mettre en place le modèle GRP de manière opérationnelle sur 13 bassins versants. Les améliorations du modèle au cours de l'année 2020 ont conduit à l'implémentation opérationnelle de GRP aux pas de temps 15 minutes et 1 heure.

Le rapport rappelle tout d'abord le contexte de l'étude et les résultats des précédentes études menées sur le territoire réunionnais, Ensuite, il décrit les bassins étudiés et les données hydro-climatiques utilisées. Après une présentation du modèle et des critères d'analyse, une partie importante du rapport est consacrée aux tests réalisés et aux résultats du calage du modèle pour les treize bassins versants. Une discussion quant à la pertinence de l'implémentation opérationnelle vient compléter ces résultats de calage. Enfin, une dernière partie relative à l'implémentation opérationnelle de GRP aux pas de temps 15 minutes et 1 heure vient conclure ce rapport.

# 1. Contexte de l'étude

## 1.1. Géomorphologie de l'île de La Réunion

L'île de La Réunion est située dans l'Océan Indien, à un peu moins de 700 km à l'Est de Madagascar. Elle couvre une superficie de 2512 km<sup>2</sup> qui s'étend sur une ellipse dont la longueur maximale, sur la diagonale Nord-Ouest / Sud-Est, est de 70 km. L'île comprend deux volcans : le Piton des neiges, situé au centre de l'île et dont il est le point culminant, est aujourd'hui inactif ; et le Piton de la Fournaise, situé au Sud-Est de l'île et à ce jour l'un des volcans les plus actifs au monde, entre encore en éruption plusieurs fois par an.

Née d'une activité volcanique forte, l'île de La Réunion jouit d'un relief particulièrement marqué, avec des sommets atteignant les 3070 m d'altitude (Piton des neiges), comme représenté sur la Figure 1. Sur la chaîne du Piton des neiges, on trouve également le deuxième point le plus élevé de l'île : le Gros Morne qui culmine à 3020 m d'altitude. Enfin, le troisième sommet est le Piton de la Fournaise qui s'élève à plus de 2600 m d'altitude. Par ailleurs, l'île doit également son relief escarpé au phénomène d'érosion.

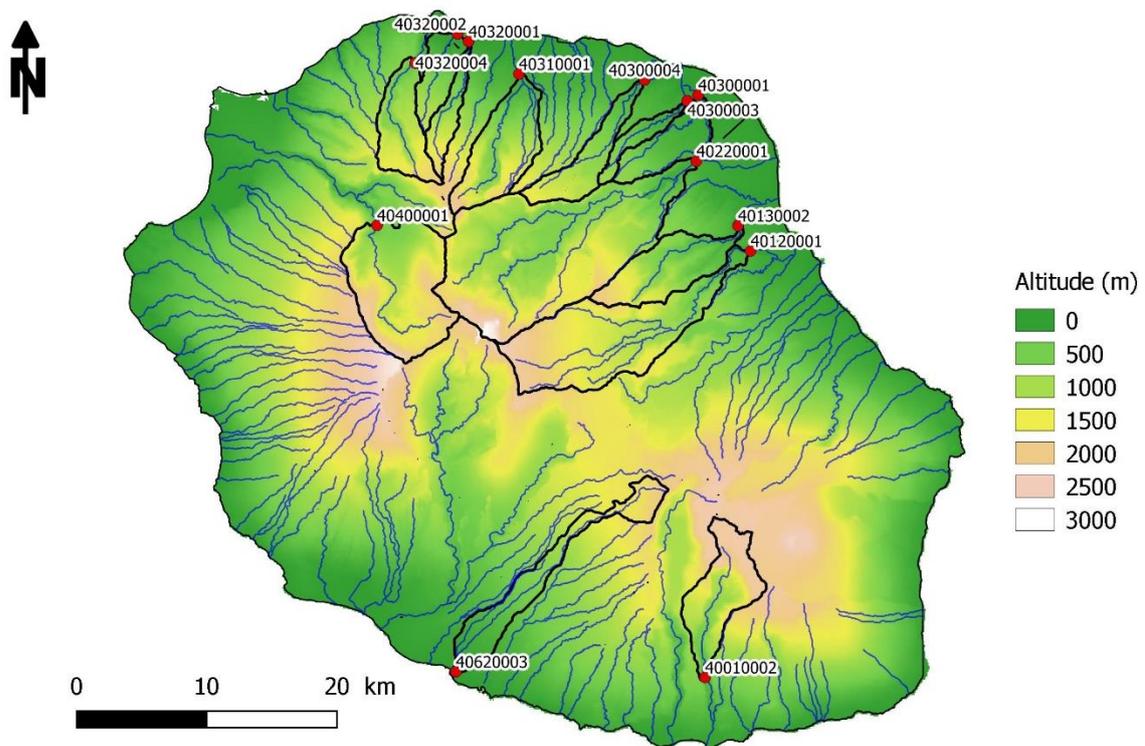


Figure 1 : Altitudes (en m) sur l'île de la Réunion et localisation des bassins versants étudiés (contours en noir et exutoires en rouge)

## 1.2. Contexte climatique

L'île 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 (voir pluviométrie mensuelle interannuelle sur la Figure 2).

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 190mm en moyenne sur toute l'île d'après Pohl et al. (2016).

L'étude de Réchou et al. (2019) sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur La Réunion a analysé la variabilité saisonnière sur une période de 37 ans de 54 postes pluviométriques de La Réunion. Les résultats sont compilés dans le Tableau 1. A l'échelle de l'île, les précipitations ont lieu principalement à l'été (11,5 mm/jour en moyenne) et diminue au cours de l'année pour atteindre un minimum au printemps (2,7 mm/jour en moyenne). L'été est également la saison cyclonique (19 cyclones passés à moins de 300 kms durant la période étudiée). Le maximum de précipitations journalières durant un de ces cyclones s'élève à 1760 mm.

**Tableau 1 : Précipitations journalières moyennes (Mean), écart-type (SD), maximum (Max) par saison.**

Saison	Moyenne (mm/j)	Ecart-type (mm/j)	Maximum (mm/j)
DJFM	11,5	40	1760
AM	5,8	19	696
JJA	3,5	12	637
SON	2,7	11	424

Les plus hauts sommets de la chaîne montagneuse centrale qui s'étend sur la diagonale Nord-Ouest / Sud-Est, découpent l'île en deux zones météorologiques distinctes. La côte-au-vent d'une part, s'étend à l'Est de la chaîne centrale, reçoit les alizés de plein fouet et connaît une pluviométrie annuelle particulièrement élevée. D'autre part, la côte-sous-le-vent qui s'étend à l'Ouest de la chaîne centrale est protégée par les massifs montagneux et rencontre une pluviométrie plus faible. Sur la Figure 2, nous avons tracé pour deux bassins, l'un situés sur la côte-au-vent (Rivière des Marsouins à Bethleem - bassin 40120001, en vert) et l'autre sur la côte-sous-le-vent (Rivière des Galets – Barrage - bassin 40400001, en bleu), la pluviométrie mensuelle interannuelle. On constate bien que la côte-au-vent est nettement plus arrosée.

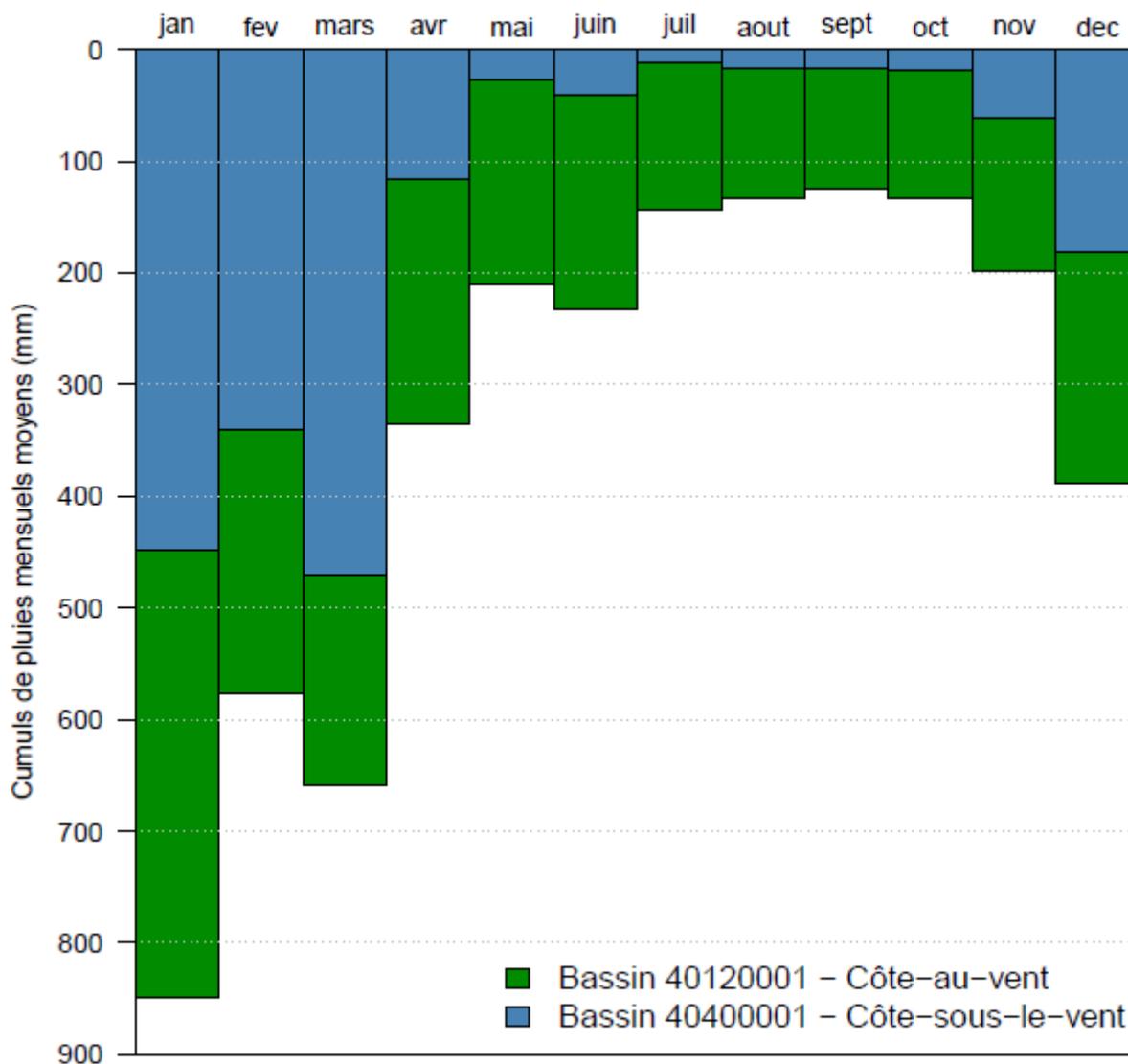


Figure 2 : Pluviométrie mensuelle interannuelle sur un bassin de la côte-au-vent (bassin 40120001, en vert) et sur un bassin de la côte-sous-le-vent (bassin 40400001, en bleu) – source : données ANTILOPE 15' Météo-France

Le réseau hydrographique de l'île est très dense et comprend des rivières pérennes mais également des ravines qui sont en eau uniquement durant des épisodes de précipitations.

Pour les deux bassins présentés précédemment, nous avons représenté la lame d'eau mensuelle moyenne (calculée à partir du débit spécifique (mm/j) =  $86.4 \cdot \text{débit (m}^3/\text{s)} / \text{surface (km}^2\text{)}$ ). Les régimes sont similaires mais les débits sont bien plus importants sur la côte-au-vent que sur la côte-sous-le-vent.

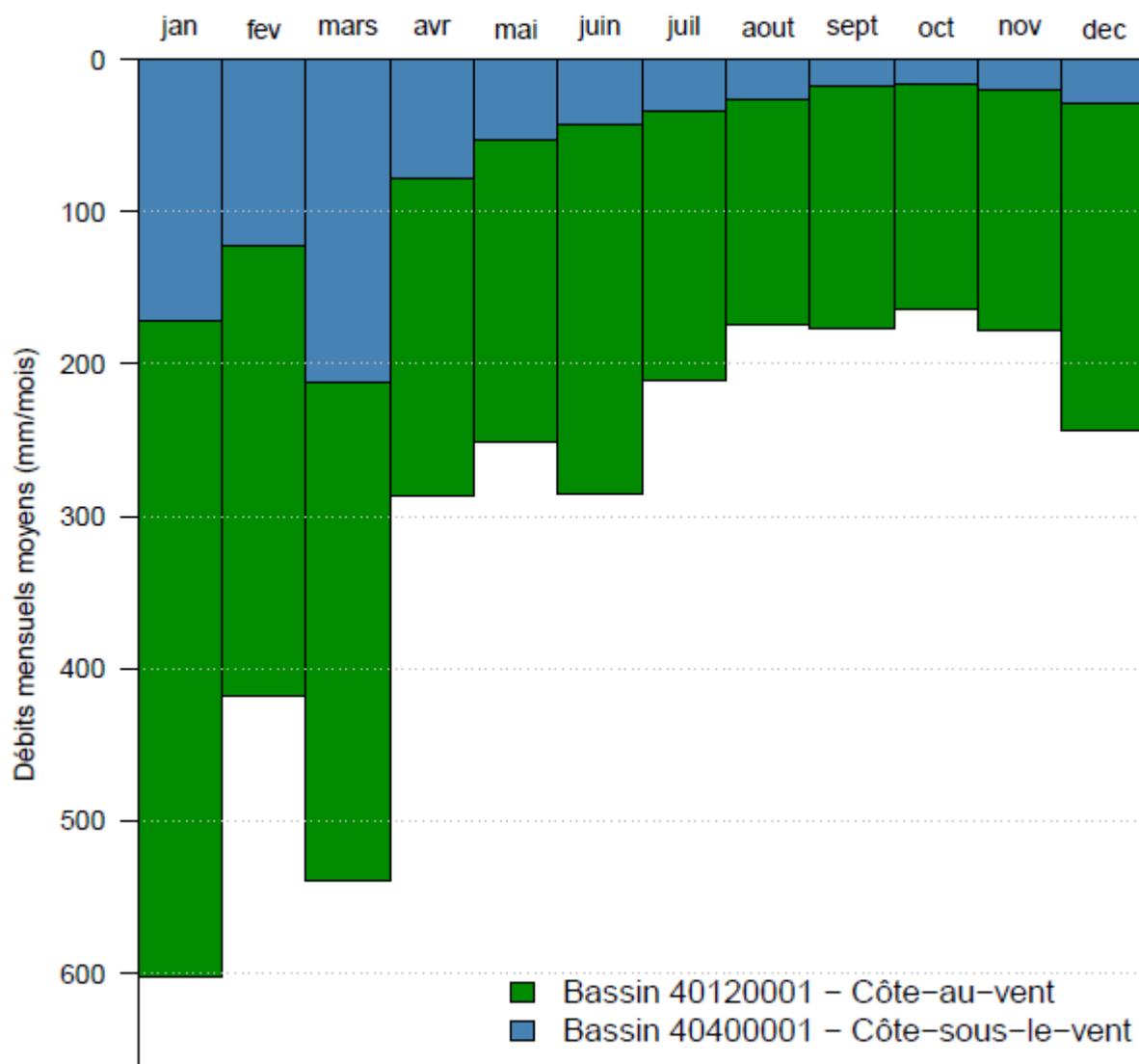


Figure 3 : Lame d'eau mensuelle interannuelle sur un bassin de la côte-au-vent (bassin 40120001, en vert) et sur un bassin de la côte-sous-le-vent (bassin 40400001, en bleu) – source : données CVH

Par ailleurs, la faible surface des bassins et leurs pentes fortes rendent les transferts en eau rapides et génèrent des temps de concentration très courts, de l'ordre de l'heure ou inférieurs.

### 1.3. Expériences de modélisation hydrologique des bassins réunionnais

#### 1.3.1. Le modèle de simulation GR4H

Une étude a été réalisée par Bildstein (2017) sur l'implémentation du modèle GR4H (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaire) pour une sélection de bassins réunionnais. Le modèle GR4H est un modèle continu de simulation (c'est-à-dire qu'il fonctionne sans assimilation de données) de type conceptuel. Il fonctionne à pas de temps horaire et possède 4 paramètres à caler. Il est construit comme une succession de réservoirs qui permettent d'évaluer les quantités d'eau « produites » des précipitations au débit à l'exutoire du bassin et leur transfert dans le temps. Dans son étude, Bildstein (2017) a mené un travail conséquent de critique de données et a mis en lumière quelques anomalies : décrochement dans les données de débits, rapports précipitation/débit aberrants, données manquantes, etc. En termes de modélisation, les résultats ont montré que l'application du modèle semblait envisageable pour un quart des bassins étudiés. Pour le reste des bassins, les pertes de performance semblent

s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs : les problèmes de cohérence des données d'entrée utilisées mais également le besoin d'affiner l'information de pluie tant de manière spatiale que temporelle. Dans cette logique, Paluszkiewicz (2019) a mené une analyse sur l'applicabilité de la méthode AIGA sur cette même sélection de bassins versants.

### 1.3.2. La méthode AIGA

La méthode AIGA (Adaptation d'Informations Géographiques à l'Alerte en crue) a pour objectif d'estimer les périodes de retour de débits prévus à partir de données de précipitations spatialisées de type radar. Pour ce faire la méthode repose sur le modèle GRD (modèle du Génie Rural Distribué). GRD est un modèle distribué qui permet de prendre en compte des informations plus fines que l'échelle du bassin versant. On travaille ici à l'échelle de pixels de 1 km<sup>2</sup>. Le modèle possède dix paramètres à caler mais offre la possibilité de ne choisir que certains de ces paramètres en fonction du bassin étudié et des processus hydrologiques qui y prédominent. Dans la version utilisée par Paluszkiewicz (2019), seuls trois paramètres ont été conservés :

- Cp, la capacité du réservoir de production en mm,
- Ctr, la capacité du réservoir de transfert rapide en mm,
- Cr, la capacité du réservoir de routage en mm

Les résultats de cette étude ont montré des similarités avec les conclusions de Bildstein (2017) : les performances sont intéressantes sur certains bassins mais sur certains les erreurs faites sur les valeurs des pics de crues sont fortes. Par ailleurs, le pas de temps 15 minutes a été testé et a semblé apporter une amélioration des résultats, mais toutefois assez limitée. Enfin, Paluszkiewicz (2019) a également évalué l'impact de l'origine de la lame d'eau utilisée et a comparé les performances du modèle avec les lames d'eau radars PANTHERE et les lames d'eau issues de l'interpolation des données pluviométriques. Les résultats ont montré que pour certains bassins la lame d'eau radar était plus pertinente et vice versa.

### 1.3.3. Le modèle de prévision GRP

L'étude de Viatgé (2019) consistait en une évaluation de la pertinence de la mise en place du modèle de prévision des crues GRP (modèle du Génie Rural pour la Prévision des crues) sur une sélection de dix-sept bassins versants réunionnais. GRP est un modèle continu conceptuel global à 3 paramètres. Il est possible de l'utiliser à différents pas de temps. Le modèle est doté d'un module d'assimilation de données permettant de corriger l'erreur du modèle à l'instant de prévision.

Comme pour les études précédentes, un gros travail de critique de données a été réalisé, mettant en évidence des détarages importants pour certaines stations hydrométriques. Dans cette étude, deux jeux de données pluviométriques ont été testés : pluies au sol calculées à l'aide de postes pluviométriques et pluies radar PANTHERE. L'information radar a semblé plus pertinente que l'information issue des postes pluviométriques. Des tests avec des pluies radar ANTILOPE avaient également été menés et avaient donné des résultats intéressants malgré des chroniques disponibles relativement courtes. Le modèle avait été implémenté au pas de temps horaire en raison de temps de calcul particulièrement long pour la version infra-horaire du modèle GRP mais la réactivité des bassins versants étudiés suggérait plutôt une utilisation du modèle au pas de temps 15 minutes.

## 2. Données

Les données utilisées pour cette étude sont :

- Précipitations : les données utilisées sont issues de la réanalyse ANTILOPE (ANalyse par spaTialisation hOraire des PrÉcipitations) au pas de temps 15 minutes de Météo-France<sup>1</sup>,
- 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.

Ces données seront présentées plus en détail dans la suite du rapport (partie 4.1).

### 2.1. Bassins versants étudiés

La présente étude porte sur 13 bassins versants, majoritairement répartis au Nord de l'île (11 des 13 bassins), et dont les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau 2. 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 (comme GRP) 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 2 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>.

---

<sup>1</sup> <http://41.213.202.31:8080/geonetwork/srv/api/records/02b27d0f-13dd-4435-8fc8-e4556888226a>

Tableau 2 : Caractéristiques des 13 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 – Bethleem	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
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	36.54	19	552	2054

## 2.2. Données hydrométriques

Les données hydrométriques des 13 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.

La disponibilité des données sur la période couverte par les précipitations ANTILOPE est présentée à la Figure 4. Pour chaque bassin, chaque point de la chronique représente une valeur non-lacunaire. Certaines stations présentent un nombre de lacunes assez important : Pluies-Domenjod (40310001 – 32% de lacunes sur la période 01/2013 – 01/2020) et Durand-Vélodrome (40320001 – 60% de lacunes sur la période 01/2013 – 01/2020) en particulier.

En termes de qualité des données, les analyses de Bildstein (2017) et Paluszkiewicz (2019) ont soulevé la présence de nombreux détarages au sein des chroniques. Ces observations ont été confirmés par les travaux de Darienzo 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. Une analyse du bilan en eau des différents bassins sera présentée ultérieurement (partie 4.1.2).

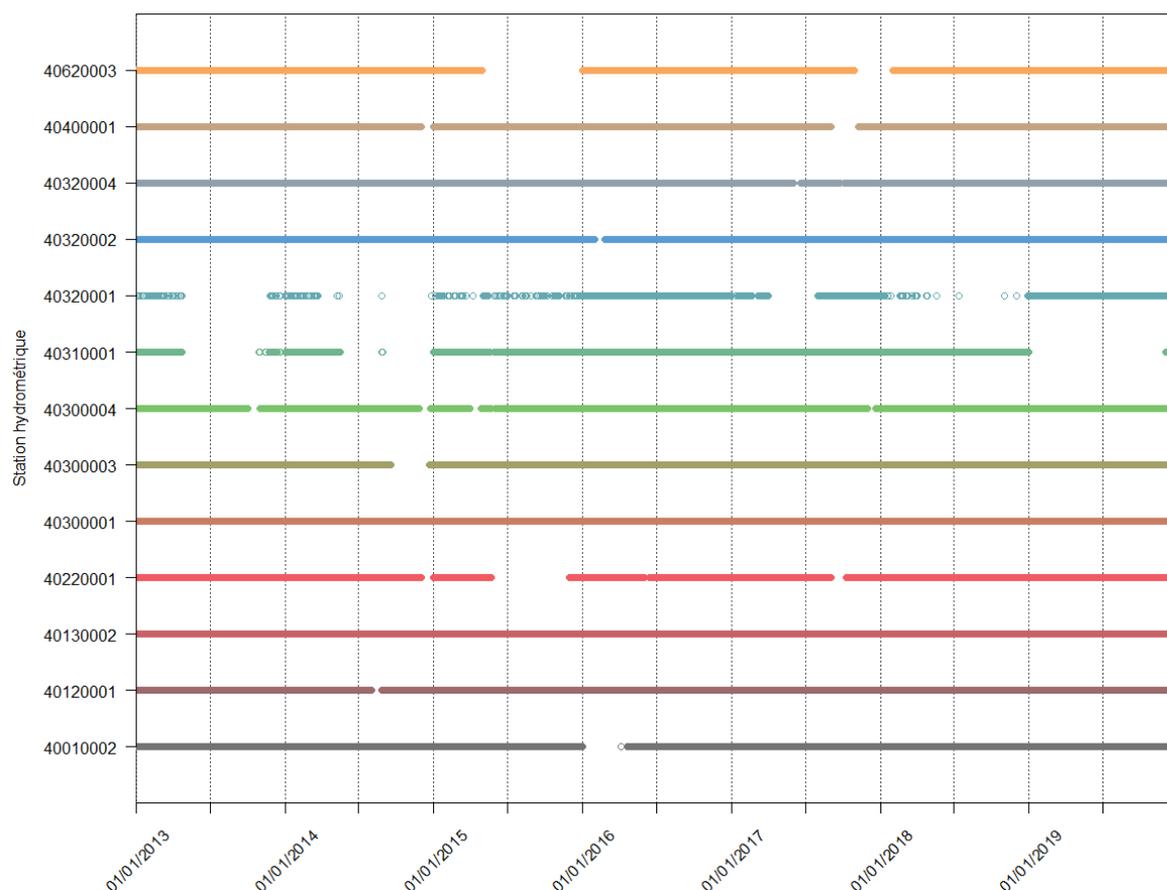


Figure 4 : Données disponibles par station hydrométrique sur la période 2013-2019 : un trait plein indique une donnée, un espace indique une lacune.

## 2.3. Données météorologiques

### 2.3.1. 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>.

Le modèle GRP utilisé et présenté dans la partie 3.1 est un modèle global qui prend notamment en entrée des données de précipitations moyennées et donc considérées comme homogènes à l'échelle du bassin versant. Les précipitations ont donc été agrégées pour fournir une pluie de bassin en entrée du modèle GRP. Bien que le modèle GRP puisse agréger une donnée fine à un pas de temps plus large (typiquement, agrégation de la donnée au pas de temps 15 minutes vers le pas de temps horaire), les données utilisées pour le modèle au pas de temps horaire ont été agrégées manuellement en amont de la mise en place du modèle afin de faciliter la mise à jour des bases de données de pluies en temps réel. En effet, le modèle sera alimenté par une lame d'eau horaire (lame d'eau « BEST »).

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).

### 2.3.2. Evapotranspiration 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.

Le Tableau 3 donne la liste des stations permettant le calcul de l'ETP, avec leur altitude et date de mise en service et la Figure 5 donne la position géographique des stations.

Tableau 3 : Code, nom, altitude et date de mise en service des différentes stations permettant le calcul de l'ETP, disponibles sur le territoire réunionnais

Code station	Nom de la station	Altitude (m)	Date début
97402240	BELLEVUE BRAS-PANON	480	29/03/2016
97404540	PONT-MATHURIN	19	30/10/2015
97406220	PLAINE DES PALMISTES	1032	10/03/2016
97407520	LE PORT	9	12/12/2015
97410238	SAINT-BENOIT	43	29/10/2015
97413520	COLIMACONS	798	21/01/2016
97415536	PETITE-FRANCE	1200	04/11/2014
97415566	PITON-MAIDO	2150	20/08/2011
97415590	POINTE DES TROIS-BASSINS	5	06/06/2018
97416463	PIERREFONDS-AEROPORT	21	01/01/2013
97417360	LE BARIL	115	18/12/2015
97418110	GILLOT-AEROPORT	8	01/01/1953
97419350	GROS PITON SAINTE-ROSE	181	07/09/2017
97419380	BELLECOMBE-JACOB	2245	18/02/2012
97422440	PLAINE DES CAFRES	1560	28/03/2000
97424410	CILAOS	1197	07/04/2012

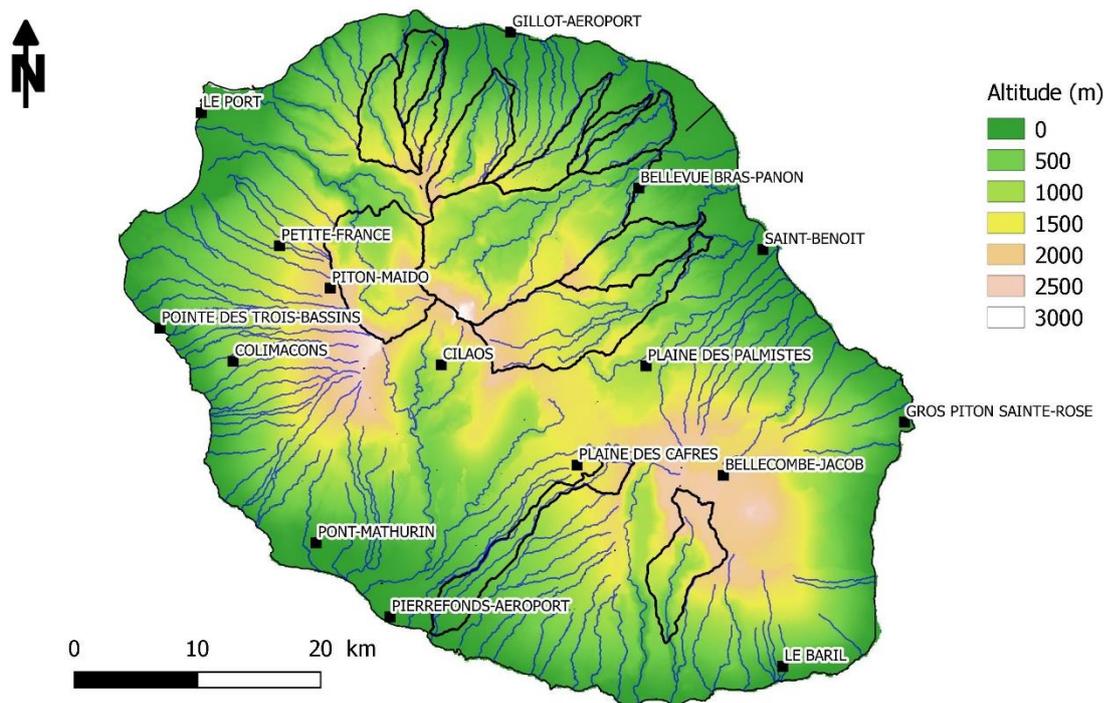


Figure 5 : Stations utilisées pour le calcul des ETP de bassin.

Ce jeu de données est constitué d'une chronique longue et quasi-complète pour le poste Gillot-Aéroport (97418110) allant de 01/1981 à 12/2019. Les 15 autres postes ont des chroniques de longueur variable sur la période 2000 – 2020 et présentent un certain nombre de lacunes. La disponibilité des données sur la période 2000 – 2020 est présentée à la Figure 6.

Les chroniques des 15 stations ne couvrant pas la totalité de la période de calage escomptée (période de disponibilité de données de précipitations de 12/2013 à 01/2020), la reconstitution de chroniques longues s'est avérée nécessaire :

- 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 évènements de crues.

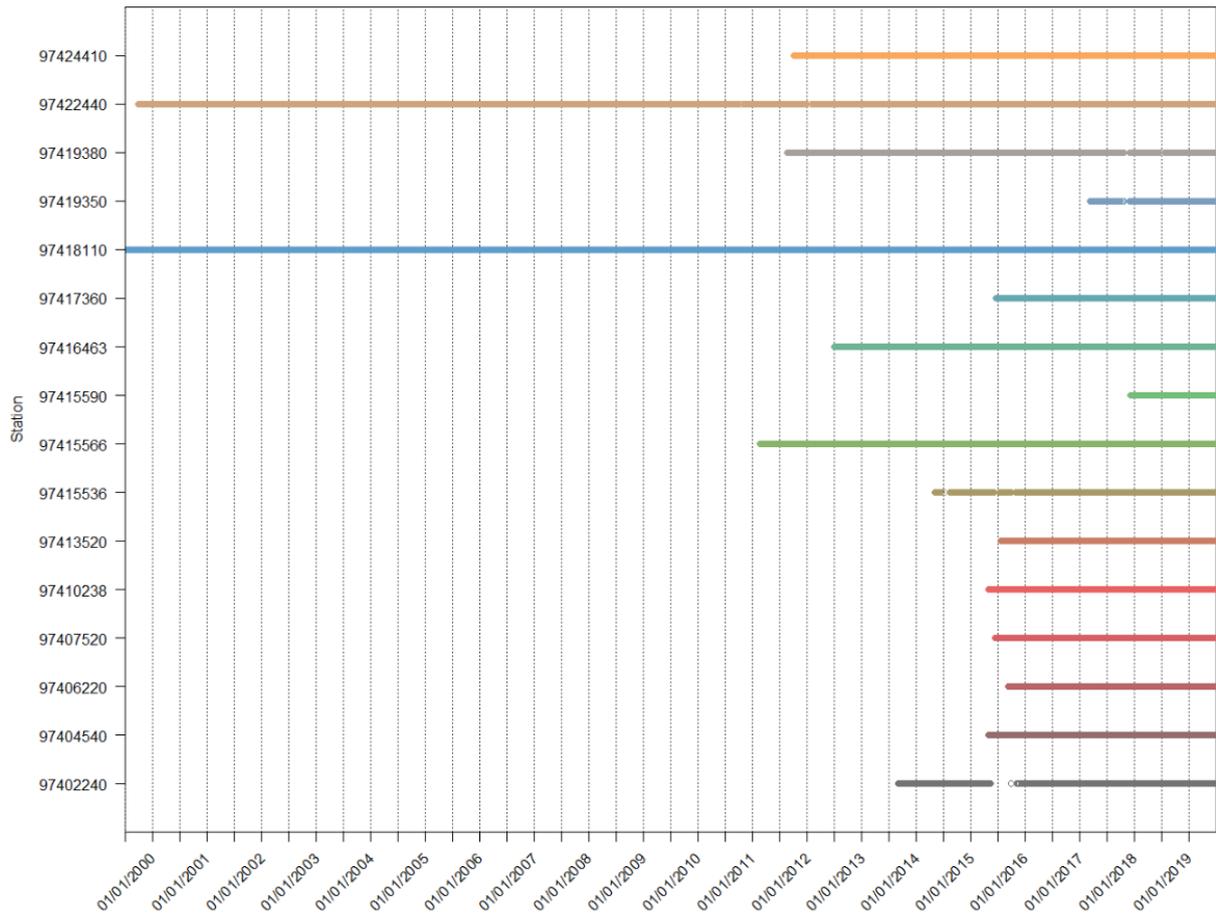


Figure 6 : Données disponibles par station permettant le calcul de l'ETP : un trait plein indique une donnée, un espace indique une lacune

### 3. Modèle et méthode d'analyse

Dans cette partie, les parties relatives à la présentation du modèle ont été reprises du rapport de l'étude de Viatgé (2019).

#### 3.1. 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 7, 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.

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.

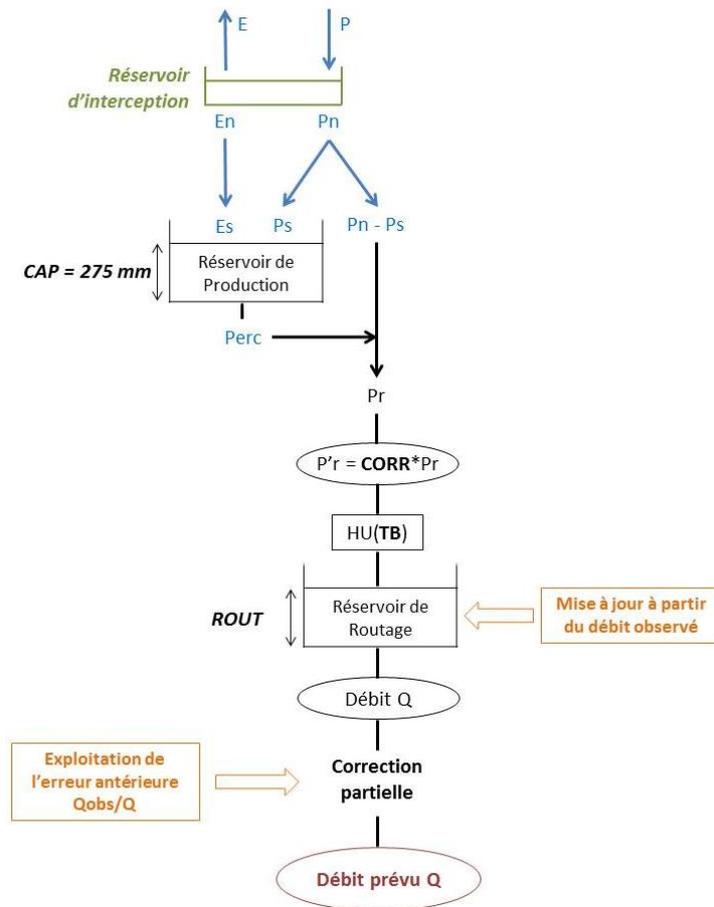


Figure 7 : Schéma de la structure du modèle GRP dans la version fonctionnant à différents pas de temps (Source : Viatgé et al., 2019).

## 3.2. Calage du modèle et méthode d'évaluation

### 3.2.1. Méthode de calage « pas-à-pas »

Le calage du modèle est réalisé selon une méthode dite « pas-à-pas » développée à Irstea (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.

### 3.2.2. 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.

### 3.2.3. 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 8, 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.

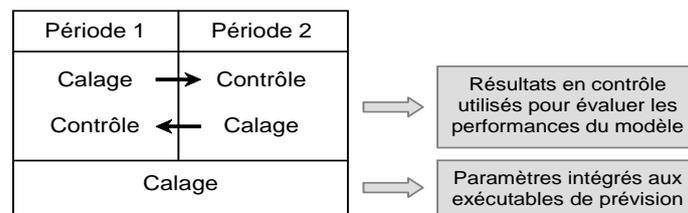


Figure 8 : Illustration de la procédure de calage-contrôle.

## 3.3. Critères d'évaluation numériques continus

### 3.3.1. 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.

### 3.3.2. 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 :

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

### 3.3.3. 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

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>

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. 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).

### 3.4. 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.

### 3.4.1. 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.

### 3.4.2. 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.

### 3.4.3. 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.

#### 3.4.4. 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.

### 3.5. Options de calage

Comme présenté dans les parties ci-dessus, le modèle GRP dispose de plusieurs options de calage. Nous présentons ici les différentes options de calage qui s'offrent à l'utilisateur.

#### 3.5.1. Pas de temps du modèle

Depuis la version 2018 du modèle, le modèle GRP fonctionne à différents pas de temps (pas de temps disponibles : 5 min, 6 min, 15 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h et 1 j). Pour alimenter le modèle, les données de précipitations doivent être à un pas de temps plus fin ou égal au pas de temps du modèle.

#### 3.5.2. Choix de la configuration de calage

Quatre options de configuration sont disponibles lors du calage du modèle en croisant les choix suivants :

- Avec ou sans utilisation du module de neige CemaNeige
- Exploitation de l'erreur antérieure (avec le dernier débit observé avant l'instant de prévision) via une correction de type autorégressif (méthode Tangara) ou par un réseau de neurones artificiels (méthode RNA).

#### 3.5.3. Référentiel temporel

Le référentiel temporel utilisé pour la mise en place sera le temps universel, noté TU. Toutes les données ont été converties dans ce référentiel lors de la préparation des données hydro-climatiques.

#### 3.5.4. Seuil et horizon de calage

Ces éléments ont été présentés dans la partie 3.2.2.

Le seuil de calage sera choisi de manière à ne pas prendre en compte les bas débits jugés peu fiables dans le calage du modèle.

L'horizon de calage correspond à l'échéance à laquelle les performances du modèle seront évaluées et pour lequel le modèle sera optimisé. Les développeurs du modèle préconisent d'utiliser a minima le temps de réaction du bassin. Une autre option est de fixer l'horizon de calage en fonction de l'horizon souhaité pour la vigilance (ou la prévision).

### 3.5.5. Période de calage

La période de calage est fixée par la disponibilité des données de pluie et d'ETP. En effet, le modèle opère une recherche des deux sous-périodes les plus longues sans lacune de pluie et d'ETP pour réaliser le calage et la validation du modèle.

### 3.5.6. Seuil de vigilance

GRP calcule les performances du calage pour les débits supérieurs au seuil de vigilance. Un seuil de vigilance trop élevé conduit à retenir un nombre restreint d'évènements pour la validation du modèle. A l'inverse, un seuil de vigilance trop faible peut également influencer de manière négative l'évaluation des performances du modèle. En effet, la table de contingence, à l'aide de laquelle sont calculés les critères de dépassement de seuils, est établie pour les débits inférieurs au seuil de vigilance. En choisissant un seuil de vigilance trop faible, les bas débits, sur lesquels l'incertitude de mesure est importante, peuvent être pris en considération dans le calcul des critères et tendent à augmenter artificiellement le taux de fausses alertes. En prenant un seuil de vigilance suffisamment élevé, ce risque est écarté. Dans son étude, Viatgé (2019) avait utilisé un seuil de vigilance égal au quantile 70% des débits observés (valeur de débit pour laquelle 30% des débits observés sont supérieurs à cette valeur). Ce débit s'est avéré trop faible pour la plupart des bassins étudiés, conduisant à des critères de dépassements de seuils mauvais pour bon nombre de bassins. Une approche possible pour déterminer un seuil de vigilance acceptable est de se rapporter à la chronique et de fixer un seuil permettant de retenir un nombre fixé d'évènements en fonction de la longueur de la chronique.

## 4. Résultats

Dans cette partie, nous détaillerons le calage du modèle GRP ayant permis la mise en place opérationnelle du modèle GRP sur plusieurs bassins réunionnais. La méthode de calage, décrite ci-après, a été menée pour le modèle au pas de temps horaire. Elle doit être reproduite au pas de temps 15 minutes pour confirmer les choix réalisés et s'assurer que le paramétrage retenu s'applique bien à un pas de temps plus fin.

### 4.1. Données d'entrée

#### 4.1.1. Analyse critique des données

Les données présentées dans la partie 2 (parties 2.2 et 2.3) ont été utilisées sans modification. Le tracé des chroniques n'a pas montré de données aberrantes dans les chroniques de précipitations, de débits et d'ETP.

Afin d'évaluer l'impact des modifications dans les différentes données utilisées, nous avons tracé sur la Figure 9 les données moyennes interannuelles utilisées lors de l'étude de 2020 en fonction des données moyennes interannuelles utilisées lors de l'étude de 2019. Ces moyennes interannuelles ont été calculées sur une même période (01/01/2014 – 31/12/2018).

On remarque que les cumuls annuels de précipitations sont cohérents entre les deux études. Les pluies ANTILOPE semblent être légèrement supérieures aux pluies PANTHERE pour la quasi-totalité des bassins étudiés.

Les courbes de tarage ont été reprises par la CVH suite aux critiques de données de l'étude de Viatgé (2019). Nous avons donc considéré qu'une nouvelle analyse détaillée des données n'était pas nécessaire. Sur la Figure 9, on peut voir que pour certains bassins, la lame d'eau annuelle moyenne a

drastiquement changé notamment pour le bassin Grande rivière Saint-Jean – RN2002 (40300001) passant de près de 9000 mm à 1300 mm et pour le bassin Petite rivière Saint-Jean à la Cascade Délices (40300003) de 3700 mm à 1400 mm.

L’approche retenue pour spatialiser l’ETP est jugée plus satisfaisante que l’approche plus simple utilisée dans l’étude de 2019. Elle répond à une demande évoquée lors du comité scientifique de la CVH en 2019. Sur les onze bassins en commun entre l’étude de 2019 et l’étude de 2020, les cumuls interannuels d’ETP sont parfois très différents et l’approche de spatialisation à l’aide de plusieurs postes permet de rendre compte d’une variabilité plus importante de l’ETP sur le territoire. Il ne se dégage pas de tendance quant à une augmentation ou une diminution généralisée entre les deux approches. La variabilité de l’ETP moyenne interannuelle sur le territoire est un peu plus importante avec la spatialisation (ETP moyenne interannuelle comprise entre 870 et 2000 mm pour la méthode spatialisée contre 930 et 1880 mm pour la méthode utilisant deux postes). Un stage sur des méthodes d’estimation de l’ETP à l’échelle de La Réunion, encadré par Météo-France et débutant au moment de la rédaction de ce rapport, permettra de confirmer ou d’infirmier l’approche retenue.

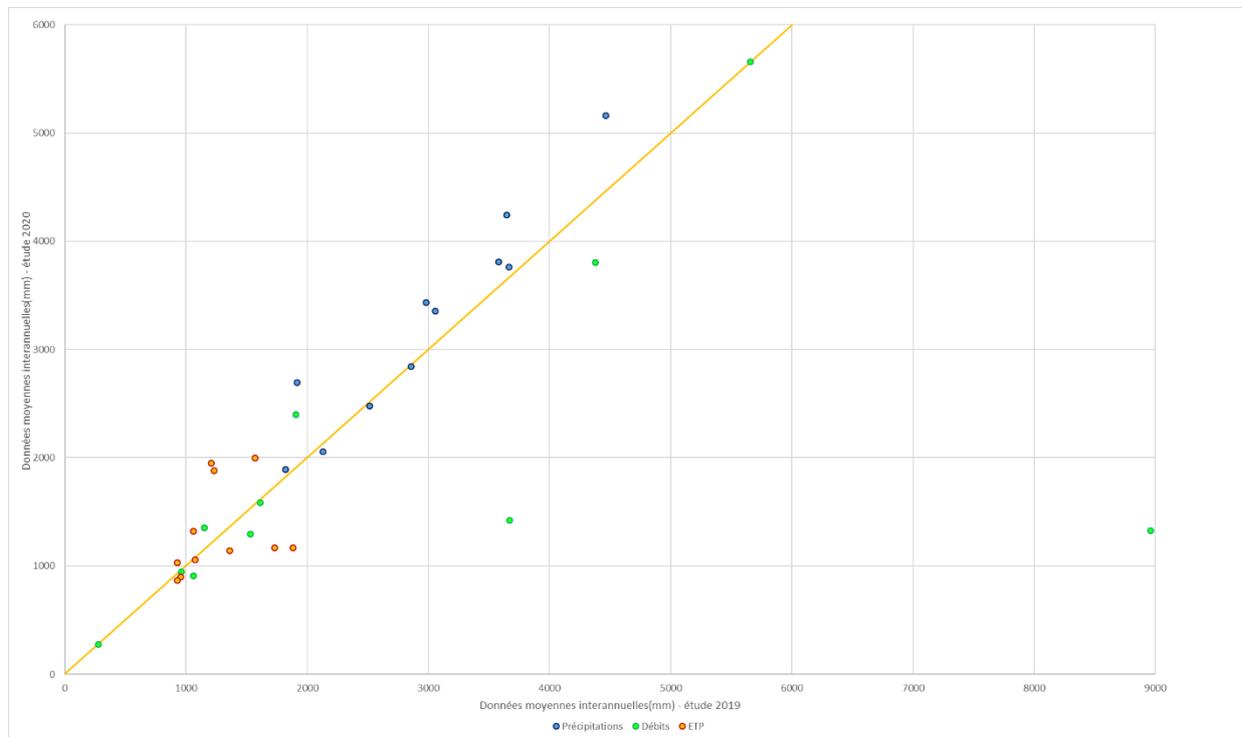


Figure 9 : Données moyennes interannuelles de l'étude 2019 en fonction des données moyennes interannuelles de l'étude 2020 sur la période 01/01/2014 – 31/12/2018

#### 4.1.2. Caractérisation hydrologique des bassins

##### a) Bilan en eau

Afin d’évaluer le bilan en eau du bassin vu par les données mesurées, nous choisissons d’utiliser le diagramme de Turc-Budyko. Cet outil permet de détecter d’éventuels problèmes de cohérence dans les données ou des comportements hydrologiques atypiques. Pour construire ce diagramme, les pluies, ETP et débits moyens interannuels sont calculés sur des chroniques sans lacunes concomitantes. Les bassins sont ensuite positionnés sur le graphique adimensionnel qui représente le coefficient d’écoulement  $Q/P$  en fonction de l’indice d’aridité  $P/E$  (voir Figure 10 pour une comparaison des données entre les études 2019 (points orange) et 2020 (points gris) et Figure 11 pour un zoom sur les

données de l'étude 2020). Si des bassins ont un coefficient Q/P supérieur à 1 (situés au-dessus de la ligne horizontale bleue sur la Figure 10), cela peut signifier que les apports en eau du bassin ne proviennent pas seulement des précipitations qu'il reçoit. Si des bassins sont situés en deçà de la ligne rouge d'équation  $y = 1-1/x$ , cela peut signifier que les pertes du bassin sont supérieures aux pertes par évapotranspiration et ont possiblement une autre origine (par exemple souterraine). Pour les bassins situés entre les lignes bleue et rouge, les données expriment que l'on peut bouclier le bilan eau sans prendre en compte des apports autres que la pluie et des pertes autres que par évaporation. Dans tous les cas, la position des bassins est aussi dépendante des données utilisées et d'erreurs potentielles dans celles-ci (P, ETP, Q et superficie). Ce diagramme est un bon outil pour donner des informations sur des comportements typiques du bassin (bassins de type karstiques, bassins de type « fuyards », etc.) ou mettre en lumière des défauts dans les données. Les valeurs de cumulés annuels moyens de précipitations, débits et ETP qui ont permis de tracer ce diagramme sont reportées dans le Tableau 5.

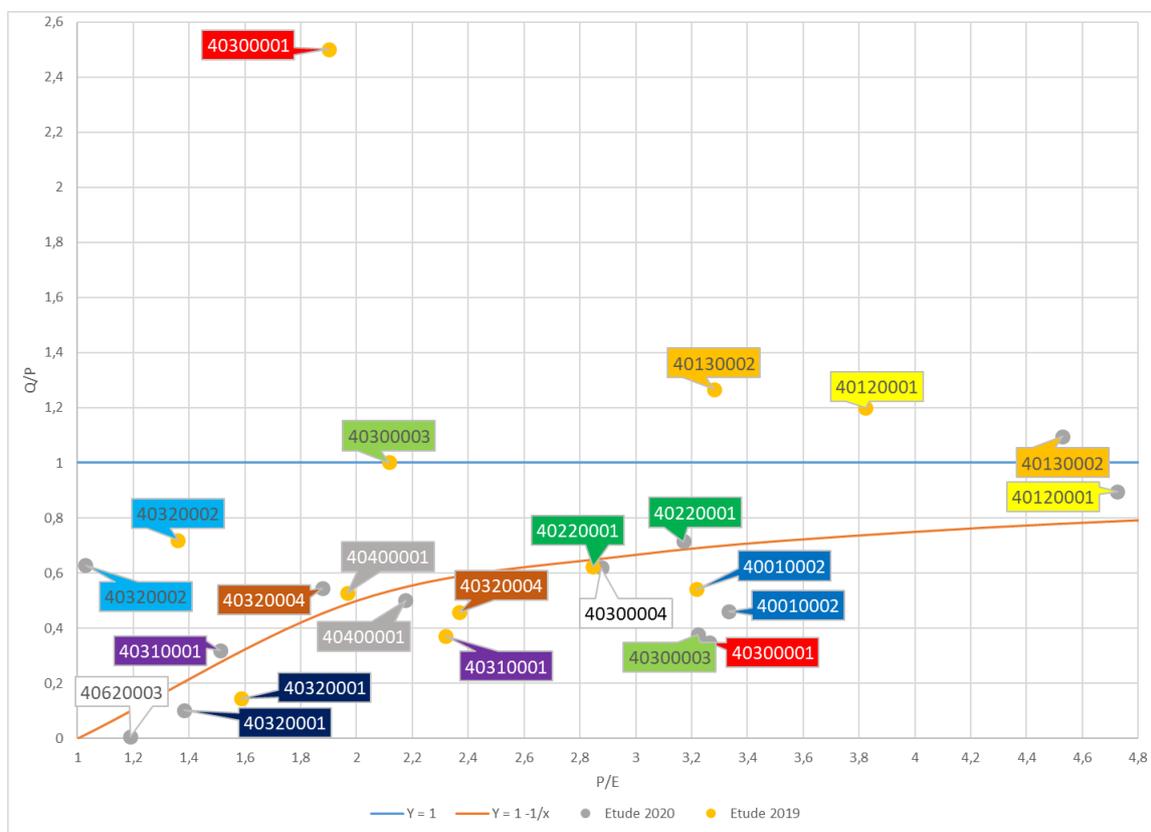


Figure 10 : Diagramme de Turc-Budyko obtenu à partir des valeurs de cumulés annuels moyens de précipitations P, débits Q et évapotranspiration potentielle E sur les périodes concomitantes entre le 01/01/2014 et le 31/12/2018 pour les données de l'étude 2019 (points orange) et de l'étude 2020 (points gris).

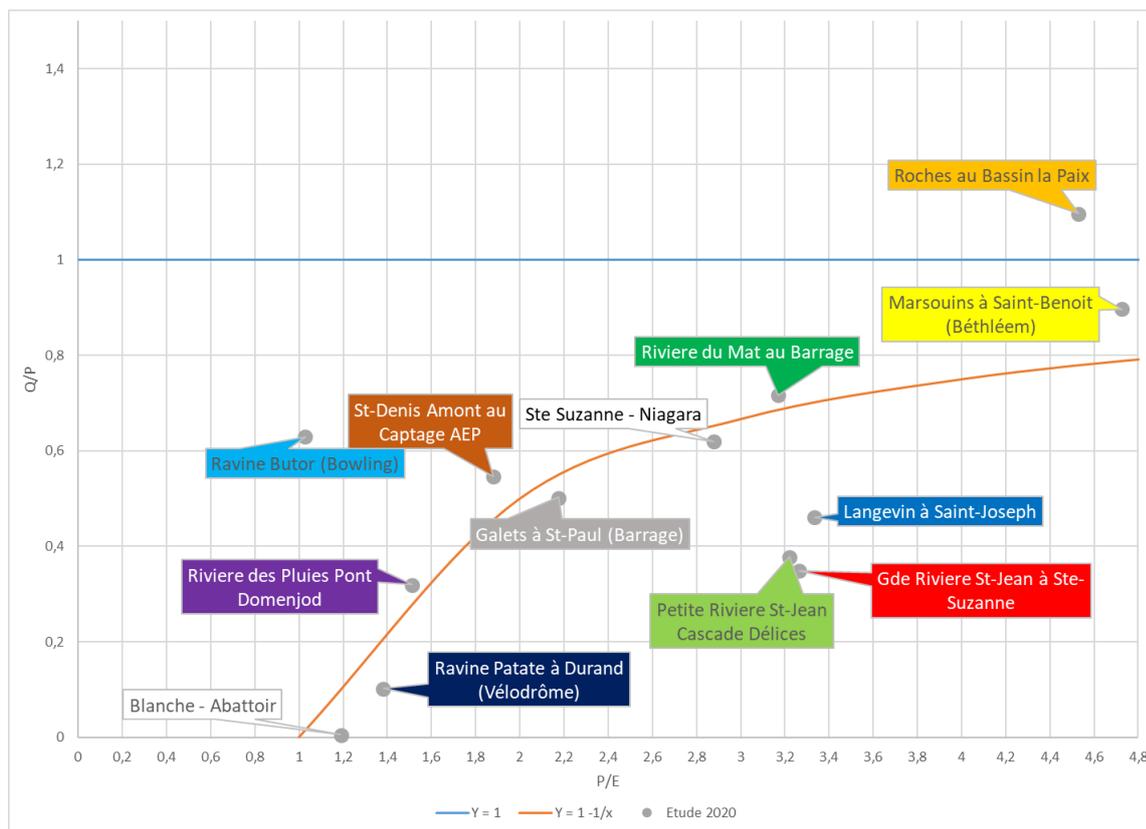


Figure 11 : Diagramme de Turc-Budyko obtenu à partir des valeurs de cumuls annuels moyens de précipitations P, débits Q et évapotranspiration potentielle E sur les périodes concomitantes entre le 01/01/2014 et le 31/12/2018 - Zomm sur les données de l'étude 2020

Tableau 5 : Valeurs de cumuls annuels moyens de précipitations, débits et ETP (mm) et rapports P/E (-) et Q/P (-) associés.

Code station	Nom station	Surface (km <sup>2</sup> )	Précip.moy. interannuelles (mm)	Débits moy. interannuels (mm)	ETP moy. interannuelles (mm)	Rapport P/E (-)	Rapport Q/P (-)
40010002	Langevin - La Passerelle	36,78	3436	1584	1031	3,33	0,46
40120001	Marsouins – Bethleem	81,66	4241	3803	898	4,73	0,90
40130002	Roches – Bassin La Paix	28,64	5159	4646	1139	4,53	1,10
40220001	Mat – Barrage	145,64	3354	2401	1058	3,17	0,72
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	23,15	3809	1328	1168	3,26	0,35
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	23,53	3525	2185	1226	2,88	0,62
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	9,52	3762	1420	1168	3,22	0,38
40310001	Pluies – Domenjod	39,16	2845	908	1883	1,51	0,32
40320001	Durand – Velodrome	12,81	2695	275	1951	1,38	0,10
40320002	Butor – Bowling	16,86	2054	1292	1996	1,03	0,63
40320004	Saint-Denis – Amont	27,01	2477	1352	1319	1,88	0,55
40400001	Galets – Barrage	68,29	1890	948	869	2,18	0,50
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	36,54	1707	9	1435	1,19	0,01

Dans l'étude de Viatgé (2019), des comportements particuliers avaient été observés pour les bassins de la Grande rivière Saint-Jean à Sainte-Suzanne (40300001) et de la Petite rivière Saint-Jean à la Cascade

Délices (40300003). Ces bassins avaient un rapport Q/P très élevé (supérieur à 2) dû aux valeurs de débits annuels moyens particulièrement fortes (supérieures à 7000 mm/an). Suite aux travaux de la CVH sur les courbes de tarage de certains bassins, ces deux bassins se situent désormais sous la courbe rouge, le débit annuel moyen étant maintenant de l'ordre de 1300 mm/an. La plupart des autres bassins sont plutôt bien équilibrés. Seul le bassin de Langevin – La Passerelle (40010002) semble perdre beaucoup d'eau. Dans le cas de la ravine Patate à Durand au Vélodrome (40320001) et de la ravine Blanche à Z.I. Abattoir (40620003), les débits sont particulièrement faibles car ces ravines ne sont pas pérennes (cf. Tableau 5). Enfin, le bassin de Roches – Bassin la Paix (40130002) est le seul bassin qui semble indiquer un bilan en eau excédentaire, avec donc potentiellement des apports souterrains. Pour tous ces bassins spécifiques, des erreurs résiduelles dans les données ne sont cependant pas à exclure.

## b) Débits caractéristiques

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 6 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).

**Tableau 6 : 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
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	28,67

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.

### c) Temps de réaction

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 7 donne, pour chaque bassin, le temps de réaction estimé par corrélation croisée. A titre indicatif, on donne le temps de réaction estimé lors de l'étude de Viatgé (2019). Plus le pas de temps des données utilisées pour estimer ce temps de réaction sera fin, plus il sera possible de l'affiner. Dans cette étude, les données au pas de temps 15 minutes ont été utilisées. Globalement, les temps de réaction estimés ont peu évolué entre l'étude 2019 et cette étude. Dans son étude, Viatgé avait utilisé des données au pas de temps horaire et avait rapporté le temps de réaction estimé aux horizons discrets pour lesquels les performances sont évaluées dans le modèle GRP. Ceci explique les valeurs « grossières » obtenues.

**Tableau 7 : Temps de réaction estimé par corrélation croisée et seuil de vigilance jaune pour les 13 bassins étudiés**

Code station	Nom de la station	Temps de réaction Etude 2020	Temps de réaction Etude 2019	Seuil de vigilance jaune (m <sup>3</sup> /s)
40010002	Langevin - La Passerelle	1h30	1h	50
40120001	Marsouins – Bethleem	2h15	3h	33
40130002	Roches – Bassin La Paix	1h15	3h	50
40220001	Mat – Barrage	1h30	3h	800
40300001	Grande Saint-Jean – RN2002	1h30	3h	57
40300004	Sainte-Suzanne – Niagara	1h15		130
40300003	Petite Saint-Jean – Delice	2h15	1h	33
40310001	Pluies – Domenjod	1h15	1h	37
40320001	Durand – Velodrome	1h15	1h	67
40320002	Butor – Bowling	0h30	1h	200
40320004	Saint-Denis – Amont	2h	1h	5
40400001	Galets – Barrage	1h30	1h	270
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	3h		13

### d) Seuils de vigilance

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 7 fournit les seuils de vigilance jaunes pour les 13 stations d'étude. Ces seuils ont été ajustés pour les courbes de tarage actualisées.

#### 4.1.3. Constitution de la base de données historiques

Une fois les données récupérées, elles ont été formatées pour pouvoir être intégrées dans le modèle GRP. Les chroniques de pluie et d'ETP étant complètes sur la période de disponibilité des pluies ANTILOPE, la chronique la plus longue utilisable pour le modèle sera du 01/12/2013 au 31/12/2019.

Cette période sera scindée en deux périodes tests lors de l'évaluation du modèle en calage – contrôle (exécutable 01-Calage\_GRP.exe).

Ainsi, les périodes retenues seront :

- Période 1 : du 1er décembre 2013 – 4h au 16 juin 2017 – 13h
- Période 2 : du 16 juin 2016 – 14h au 31 décembre 2019 – 23h

Nous rappelons ici qu'une période d'initialisation du modèle d'un an est nécessaire en début de simulation et que le modèle sera donc calé et évalué sur une période de deux ans et demi.

Lors de la création de la base de données temps réel (exécutable 04-Creation\_Base\_Temps\_reel\_GRP.exe), le modèle sera calé sur toute la période hormis l'année de mise en route, soit la période du 1<sup>er</sup> décembre 2014 au 31 décembre 2019.

Pour anticiper l'alimentation du modèle au pas de temps horaire par la lame d'eau BEST (3 \* 15' ANTILOPE + 15' PANTHERE ou 4 \* 15' ANTILOPE si la donnée est disponible), les données brutes de précipitations ANTILOPE au pas de temps 15' utilisées pour le calage ont été agrégées au pas de temps horaire.

## 4.2. Paramétrage du modèle GRP

### 4.2.1. 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.

La CVH a fait part de sa volonté d'utiliser le programme d'abaques de dépassement de seuils fourni avec le modèle GRP. Dans la version 2018 de GRP, ce programme ne fonctionne qu'à partir du pas de temps horaire et jusqu'au pas de temps journalier. Ainsi, le calage du modèle sera réalisé au pas de temps horaire pour permettre l'utilisation du programme d'abaques par la CVH.

Pour prendre en considération la réactivité importante de quelques bassins versants, il est intéressant de caler le modèle GRP pour des pas de temps plus fins (15' et 30'). Ceci n'avait pu être réalisé dans l'étude de Viatgé (2019) en raison de temps de calcul extrêmement longs pour les pas de temps fins. Suite à la réduction importante des temps de calcul pour le calage du modèle aux pas de temps fins dans la version 2018 mise à jour, des tests de calage seront réalisés aux pas de temps 15'. Ceci permettra d'évaluer si le fonctionnement à un pas de temps plus fin permet d'améliorer la prévision sur les bassins les plus réactifs.

#### 4.2.2. 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 (voir partie 4.1.2 c)). Pour chaque pas de temps, GRP dispose d'une gamme d'horizons possibles et les temps de réaction estimés ne correspondent pas toujours à ces horizons possibles. Dans ce cas, l'horizon 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 8 présente les horizons de calage finalement retenus pour le modèle au pas de temps horaire.

D'autres tests ont été menés par la CVH pour évaluer la stabilité du paramétrage du modèle en fonction de l'horizon de calage et ainsi valider l'horizon de calage souhaité pour la vigilance (ou la prévision). Les horizons de calage testés sont : 1h, 3h, 6h, 9h, 12h et 24h.

#### 4.2.3. Choix des seuils

##### a) Seuil de calage

Plusieurs seuils de calage ont été testés dans la mise en place du modèle GRP. La CVH a fourni un seuil minimum en-deçà duquel elle juge les bas débits calculés peu fiables. Dans la mesure du possible, ces seuils ont été utilisés pour réaliser le calage du modèle sur les différents bassins versants étudiés. Cependant, pour réaliser le calage du modèle, un minimum de 500 données au-dessus du seuil de calage est nécessaire sur chaque période de calage (deux sous-périodes en calage-contrôle, une période en calage complet). Pour les stations de Durand – Vélodrome (40320001) et Blanche – Abattoir (40620003), s'agissant de ravines ayant un écoulement intermittent, les chroniques de débits possèdent de nombreuses données nulles. Il n'a pas été possible de conserver le seuil préconisé par la CVH et les seuils ont donc été abaissés de manière à avoir au moins 500 données de débits par sous-période. Le Tableau 8 récapitule les seuils de calage utilisés pour les 13 bassins retenus.

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

- CVH : seuils mentionnés dans le Tableau 8,
- 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  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

##### b) 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 8,
- 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 8 donne les seuils de vigilance 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 8 : 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)
40620003	Blanche – ZI1 Abattoir	3	0,01	0,50 (80)

Pour certains bassins, le nombre de données au-dessus du seuil de vigilance est très bas (généralement sur les ravines).

#### 4.2.4. Intérêt du module neige

La prise en compte de la neige dans le modèle n'a pas été jugée utile car la neige n'a pas d'influence sur les bassins retenus. Le modèle sera donc calé sans utilisation du module de neige.

#### 4.2.5. Méthode d'assimilation

Concernant la fonction de correction des débits pour l'assimilation, les deux types de correction (correction auto-régressive (Tangara) et correction par réseau de neurones artificiels (RNA)) ont été testés.

### 4.3. Résultats des tests en calage-validation et analyse

Une fois les options de calage définies, la procédure de calage-contrôle a été lancée (exécutable 01-Calage\_GRP.exe). Dans la suite, nous nous intéresserons aux critères numériques et graphiques utilisés pour évaluer le modèle, définir la meilleure configuration de calage et produire la base de données temps réel relative à cette configuration optimale. Le tableur fourni avec le rapport compile l'ensemble

des tests réalisés et les performances du modèle selon le choix de la configuration de correction, du seuil de calage et du seuil de vigilance (voir feuille TESTS).

#### 4.3.1. Efficacité

D'un point de vue général, l'analyse de l'efficacité souligne que la configuration avec réseau de neurones (RNA) se comporte mieux que celle avec la correction Tangara (TAN). Pour la quasi-totalité des tests réalisés, la configuration RNA fournit de meilleurs résultats que la configuration TAN. Sur 12 des 13 bassins, en comparant les résultats entre ces deux configurations, avec les autres options de test identiques par ailleurs, le critère d'efficacité calculé est meilleur avec la configuration RNA. Les différences sont parfois importantes (jusqu'à +0,21 pour le bassin 40300004 (Ste Suzanne - Niagara) et +0,15 pour le bassin 40320004 (St-Denis - Amont)). Seul le bassin 40320001 (Durand - Vélodrome) présente des résultats supérieurs avec la configuration Tangara (de +0,01 à +0,03%).

#### 4.3.2. Probabilité de détection (POD)

L'analyse des probabilités de détection n'est pas aussi tranchée que celle des efficacités. Pour certains bassins, la configuration RNA fournit en permanence des meilleurs résultats, quels que soient les seuils de calage et de vigilance. C'est notamment le cas pour les bassins 40220001 (Mat - Barrage) et 40130002 (Roches - Bassin La Paix). A l'inverse, les probabilités de détection sont bien supérieures pour les bassins 40320001 (Durand - Velodrome) et 40320002 (Butor - Bowling) avec la configuration TAN. Pour les autres bassins, la différence est moins évidente.

Les POD sont très impactées par le choix du seuil de vigilance. Elles sont globalement bonnes (comprises entre 35 et 70 % pour la majorité des bassins, les maximas pour chaque bassin étant compris entre 43,9 et 83,3%). Le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir) présente de très mauvaises probabilités de détection (entre 0 et 43,9% pour les différents tests réalisés).

#### 4.3.3. Taux de fausses alertes (FAR)

Dans la majorité des modèles, la configuration TAN présente un taux de fausses alertes plus élevé qu'avec la configuration RNA. Les bassins 40220001 (Mat - Barrage) et 40310001 (Pluies - Domenjod) et dans une moindre mesure 40320002 (Butor - Bowling) semblent fournir de meilleurs résultats avec la configuration TAN pour ce critère de dépassement de seuils mais les différences ne sont pas très importantes. Globalement, les taux de fausses alertes sont assez élevés avec une médiane de l'ordre de 50% pour l'ensemble des tests réalisés.

Le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir) présente un taux de fausses alertes particulièrement élevé (entre 78,9 et 100% pour les différents tests réalisés). Ceci peut s'expliquer par la difficulté à fixer un seuil pour cette ravine dont le seuil de vigilance maximal pour calculer les critères de performances vaut 0,5 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.3.4. Indice de succès critique (CSI)

L'indice de succès critique résume la performance générale du modèle par rapport à la détection de crues (POD) en tenant compte des fausses alertes (FAR). Il est légèrement en faveur de la configuration RNA. Cependant, les différences entre les deux configurations ne sont pas très importantes.

L'indice de succès critique n'est pas très élevé pour l'ensemble des bassins (en moyenne autour de 30% pour la quasi-totalité des bassins).

Comme pour les deux critères évalués ci-dessus, le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir) présente un indice de succès critique particulièrement faible (compris entre 0 et 14,3% pour les tests effectués).

#### 4.3.5. Robustesse des paramètres d'une sous-période à l'autre

De manière générale, les paramètres sont cohérents d'une sous-période à l'autre. Il est intéressant de comparer les paramètres obtenus lors des tests réalisés avec les quantiles des paramètres de GRP calculés pour 1000 bassins métropolitains (voir Tableau 9).

Tableau 9 : Valeurs des quantiles 10, 50 et 90 des paramètres de GRP calculés au pas de temps horaire pour 1000 bassins métropolitains (Source : Manuel d'utilisation de GRP)

	<b>CORR (-)</b>	<b>TB (h)</b>	<b>ROUT (mm)</b>
<b>Quant. 0.1</b>	0,50	0,5	240
<b>Médiane</b>	0,84	8,0	935
<b>Quant. 0.9</b>	1,28	31,5	4109

Le paramètre CORR est souvent inférieur au quantile 10 pour l'ensemble des bassins versants modélisés. Les valeurs de ce paramètre sont comprises entre 0,08 et 1,02. Le paramètre est généralement stable d'une sous-période à l'autre. Cependant, pour certains bassins tels que 40010002 (Langevin - La Passerelle) ou 40300001 (Grande Saint-Jean - RN2002), des écarts de 0,1 à 0,2 sont observés entre chaque sous-période. Ces différences peuvent s'expliquer par les différences observées entre les deux sous-périodes dans la chronique de débits. Pour le bassin 40010002, la sous-période 1 présente quelques événements de crues peu importants (1 événement à 75 m<sup>3</sup>/s en mars 2015) quand la sous-période 2 présente deux événements majeurs (150 m<sup>3</sup>/s) au premier trimestre 2018.

Le paramètre TB est très stable d'une sous-période à l'autre. Pour la quasi-totalité des bassins versants modélisés, le paramètre est compris entre 2h et 3h.

Seul le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir) présente des valeurs extrêmes comprises entre 0,5 et 120h. Ceci traduit la difficulté du modèle à représenter le débit intermittent de cette ravine.

Comme pour le paramètre CORR, le paramètre ROUT se situe plutôt dans la fourchette basse de la gamme des paramètres calculés pour les 1000 bassins métropolitains. Les différences d'une sous-période à l'autre sont plus marquées pour ce paramètre. Pour l'ensemble des tests effectués, le paramètre ROUT est compris entre 0 et 333 mm. Les différences entre valeurs d'une sous-période à l'autre sont plus importantes pour la configuration RNA.

Des valeurs très basses sont constatées pour le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir). Elles sont comprises entre 0 et 204 mm. Ces valeurs sont corrélées au temps de base TB : une valeur minimale de ROUT (0 mm) conduit à une valeur maximale de TB (120 h) et inversement (ROUT = 204 mm, TB = 0,5 h). Le modèle atteint les bornes des paramètres en essayant de reproduire le signal observé.

#### 4.3.6. Ecart entre débits prévus et observés

Une rapide analyse des fiches performances permet de comparer débits observés et prévus et notamment d'évaluer la capacité du modèle à représenter les forts débits observés.

Globalement, les débits sont plutôt bien modélisés. Pour certains bassins, le modèle a du mal à représenter les forts débits. C'est le cas pour les bassins 40010002 (Langevin - La Passerelle) pour lequel les débits prévus ne dépassent pas 130 m<sup>3</sup>/s quand le maximum observé est de l'ordre de 160 m<sup>3</sup>/s. Les très hauts débits sont généralement sous-estimés comme pour le bassin 40300001 (Grande Saint-Jean - RN2002) lors de l'évènement du 24/04/2018 (débit observé = 328 m<sup>3</sup>/s, débit prévu = 122 m<sup>3</sup>/s).

Pour compléter l'analyse de la phase de calage-contrôle, les fiches « hydrogrammes prévus » fournissent une sélection des événements les plus importants.

Une première analyse visuelle montre que les pics de crue sont généralement bien représentés à l'exception du bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir). Le modèle réagit bien aux forts évènements de pluie.

En s'intéressant à l'évènement le plus important de chaque bassin, on constate que le modèle sous-estime de manière quasi-systématique le débit prévu. Cette sous-estimation va de -0,6% pour le bassin 40320004 (Saint-Denis – Amont) à -64% pour le bassin 40300001 (Grande Saint-Jean – RN2002). Seul le bassin 40300004 (Sainte-Suzanne – Niagara) a tendance à surestimer les débits prévus pour les évènements les plus importants.

Le décalage temporel entre pic de crue observé et prévu est généralement nul pour l'évènement le plus important. Pour l'ensemble des évènements sélectionnés, le décalage est compris entre 0 h et 1 h, traduisant la bonne réactivité du modèle à un évènement de pluie pour l'ensemble des bassins.

Hormis pour les bassins dont le pic de crue est très sous-estimé (40010002 et 40300001) pour lesquels le biais est important (de l'ordre de - 20%), ce critère est bon pour les autres bassins (généralement compris entre -5 et +5%). L'estimation des volumes écoulés pendant l'évènement est donc cohérente pour la plupart des bassins.

Le KGE calculé pour les différents évènements sélectionnés est généralement très bon (supérieur à 0,8). On observe une corrélation entre KGE et sous-estimation des débits de pointe de crue. Ainsi, pour les bassins pour lesquels le pic de crue est sous-estimé, le KGE est moins bon (entre 0,3 et 0,6).

Les fiches « Hydrogrammes prévus » n'ont pas mis en évidence des incohérences de données entre précipitations et débits.

Ces résultats permettent de mettre en évidence que le modèle GRP peut être implémenté de manière opérationnelle sur 12 des 13 bassins versants sélectionnés pour cette étude. L'opération de calage-contrôle nous permet d'exclure le bassin 40620003 (Blanche - ZI1 Abattoir) de la modélisation avec GRP. Toutefois, ce bassin est pour l'instant maintenu dans la mise en place opérationnelle et une analyse a posteriori sera menée pour valider l'exclusion définitive de ce bassin.

Au terme de cette première analyse, la configuration retenue pour réaliser le calage complet est indiquée dans le Tableau 10. Le seuil Q\_CVH correspond au seuil de calage fourni par la CVH pour les différents bassins et reporté dans le Tableau 8.

**Tableau 10 : Choix des options utilisées pour réaliser le calage complet du modèle GRP (seuil de calage et configuration)**

Code station	Seuil de calage	Configuration
40010002	Q10	RNA
40120001	Q_CVH	RNA
40130002	Q25	RNA
40220001	Q25	RNA
40300001	Q50	RNA
40300003	Q_CVH	RNA
40300004	0	RNA

Code station	Seuil de calage	Configuration
40310001	Q10	TAN
40320001	Q_CVH	TAN
40320002	Q_CVH	RNA
40320004	Q50	RNA
40400001	Q10	RNA
40620003	0	RNA

#### 4.4. 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 11, 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.

Tableau 11 : 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)
40010002	Langevin - La	RNA	0,763	155,46	0,29	2	58,8	28,6	47,6	0,7	25
40010002	Passerelle	RNA	0,762	156,16	0,29	2	58,8	28,6	47,6	0	25
40120001	Marsouins –	RNA	0,662	307,66	0,78	2,46	52,2	48,2	35,1	1	21,5
40120001	Bethleem	RNA	0,662	307,66	0,78	2,46	52,2	48,2	35,1	0	21,5
40130002	Roches – Bassin	RNA	0,707	117,8	1	2,46	58,3	45,2	39,4	0,88	25
40130002	La Paix	RNA	0,708	117,8	1	2,46	57,2	45,7	38,6	0	25
40220001	Mat – Barrage	RNA	0,714	113,18	0,43	2,46	50	16,7	45,5	4,12	400
40220001		RNA	0,707	113,18	0,43	2,46	50	16,7	45,5	0	400
40300001	Grande Saint-Jean	RNA	0,671	45,11	0,55	2,93	44,2	29,6	37,3	0,3	28,5
40300001	– RN2002	RNA	0,667	45,11	0,55	2,93	46,5	28,6	39,2	0	28,5
40300003	Petite Saint-Jean	RNA	0,773	29,05	0,43	2,46	38,1	11,1	36,4	1	16,5
40300003	– Delice	RNA	0,755	38,44	0,43	2,46	33,3	12,5	31,8	0	16,5
40300004	Sainte-Suzanne –	RNA	0,465	175,74	0,98	2,93	48,9	26,7	41,5	0	65
40300004	Niagara	RNA	0,465	175,74	0,98	2,93	48,9	26,7	41,5	0	65
40310001	Pluies –	TAN	0,618	17,27	0,34	2,46	48,3	22,2	42,4	0,08	40
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
40320001	Velodrome	RNA	0,612	54,58	0,33	2,03	83,3	28,6	62,5	0	7
40320002	Butor – Bowling	RNA	0,824	40	0,65	1,94	81,8	10	75	2	40
40320002		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
40320004	Amont	RNA	0,715	190,38	0,49	2,46	65,1	58,1	34,2	0	2,5
40400001	Galets – Barrage	RNA	0,68	108,74	0,33	2,46	75	20	63,2	0,38	50
40400001		RNA	0,679	108,74	0,33	2,46	75	20	63,2	0	50
40620003	Blanche – ZI1	RNA	0,794	19,45	0,08	3,96	100	60,9	39,1	0	2
40620003	Abattoir	RNA	0,793	19,45	0,08	3,96	100	60,9	39,1	0	2

Dans le Tableau 11, 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. Douze des treize 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 11 des 13 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%). Toutefois, ces résultats sont à prendre avec précaution pour certains bassins car le seuil de vigilance utilisé pour le calcul des performances est parfois trop élevé et les critères de dépassement de seuils sont calculés sur moins de 20 données. C'est notamment le cas pour les bassins 40220001, 40320001, 40320002 et 40400001.

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.

Dans la suite, nous présenterons une synthèse rapide pour chaque bassin versant étudié. Cette synthèse rappelle les options de calage retenues :

- Période de calage,
- Configuration d'assimilation,
- Horizon de calage,
- Seuil de calage,
- Seuil de vigilance.

Un tableau donne les scores de performance calculés pour différents seuils de vigilance (Q75, Q90, Q95, Q99.9 et le seuil de vigilance retenu pour l'étude (Qvig retenu)). Une synthèse de ces tableaux est également fournie dans le tableur joint au rapport (feuille PERFORMANCES\_FINALS).

Enfin, les quatre événements observés les plus importants issus des fiches « Hydrogrammes prévus » de chaque bassin sont représentés.

a) 40010002 - Langevin - La Passerelle

Le modèle GRP à Langevin - La Passerelle (40010002) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0,7 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 25 m<sup>3</sup>/s

Tableau 12 : Scores de performance du modèle GRP à Langevin - La Passerelle (40010002)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	1,42	0,67	56,5	97,7	2,3	569
Q90	3,03	0,676	67,7	89,1	10,3	203
Q95	4,18	0,69	47,5	94,4	5,3	360
Qvig retenu	25	0,762	64,7	26,7	52,4	21
Q99,9	44,78	0,777	37,5	25	33,3	9

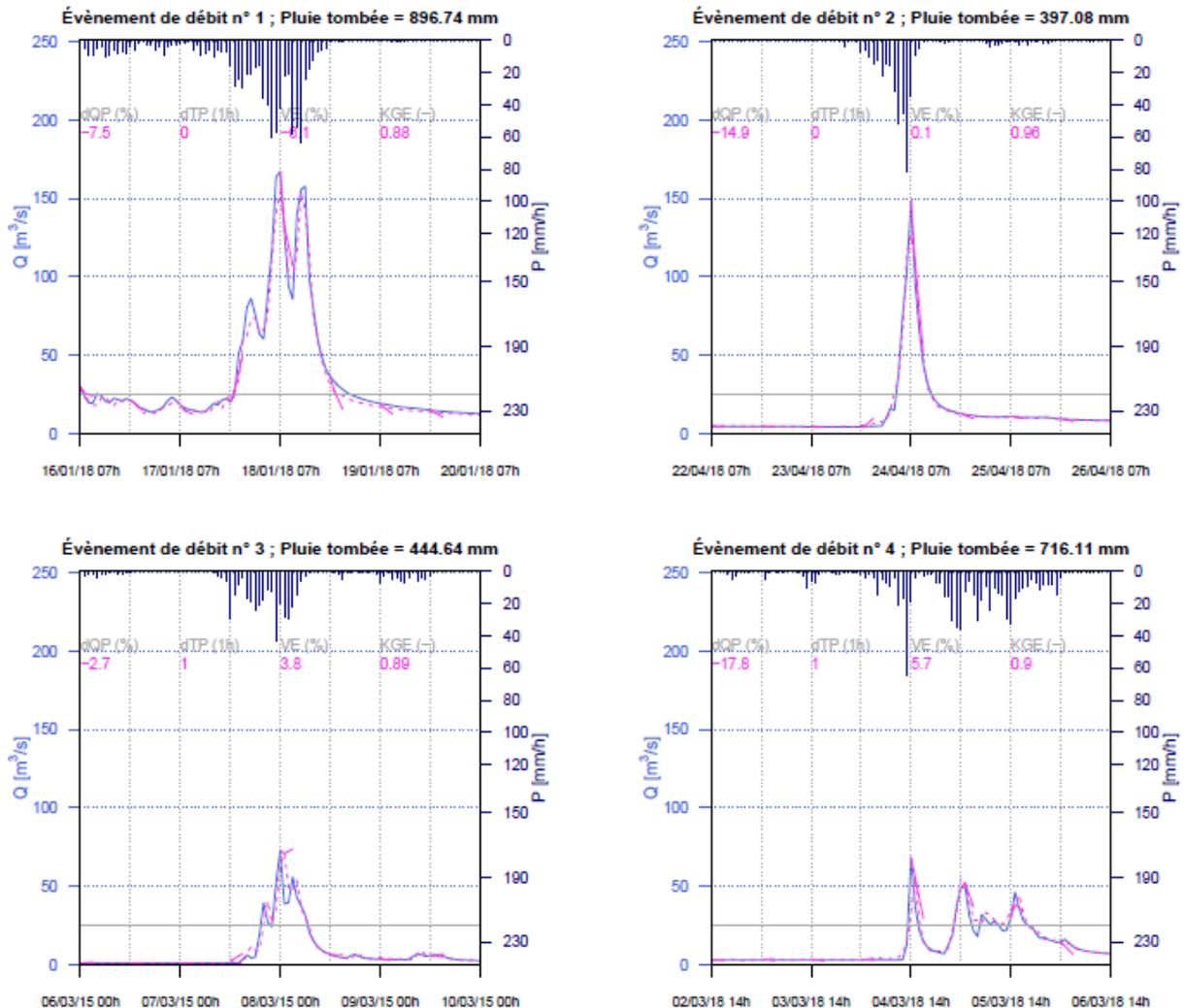


Figure 12 : Prévisions du modèle GRP à Langevin - La Passerelle (40010002) lors des évènements de 01/2018, 04/2018, 03/2015 et 03/2018

## b) 40120001 - Marsouins - Bethleem

Le modèle GRP à Marsouins – Bethleem (40120001) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 1 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 21,5 m<sup>3</sup>/s

Tableau 13 : Scores de performance du modèle GRP à Marsouins - Bethleem (40120001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	7,79	0,647	31,8	55,5	22,8	1980
Q90	12,19	0,655	41,9	56,5	27,2	556
Q95	21	0,661	54,6	40,7	39,7	209
Qvig retenu	21,5	0,662	52,2	48,2	35,1	205
Q99,9	365,19	0,723	35,7	0	35,7	14

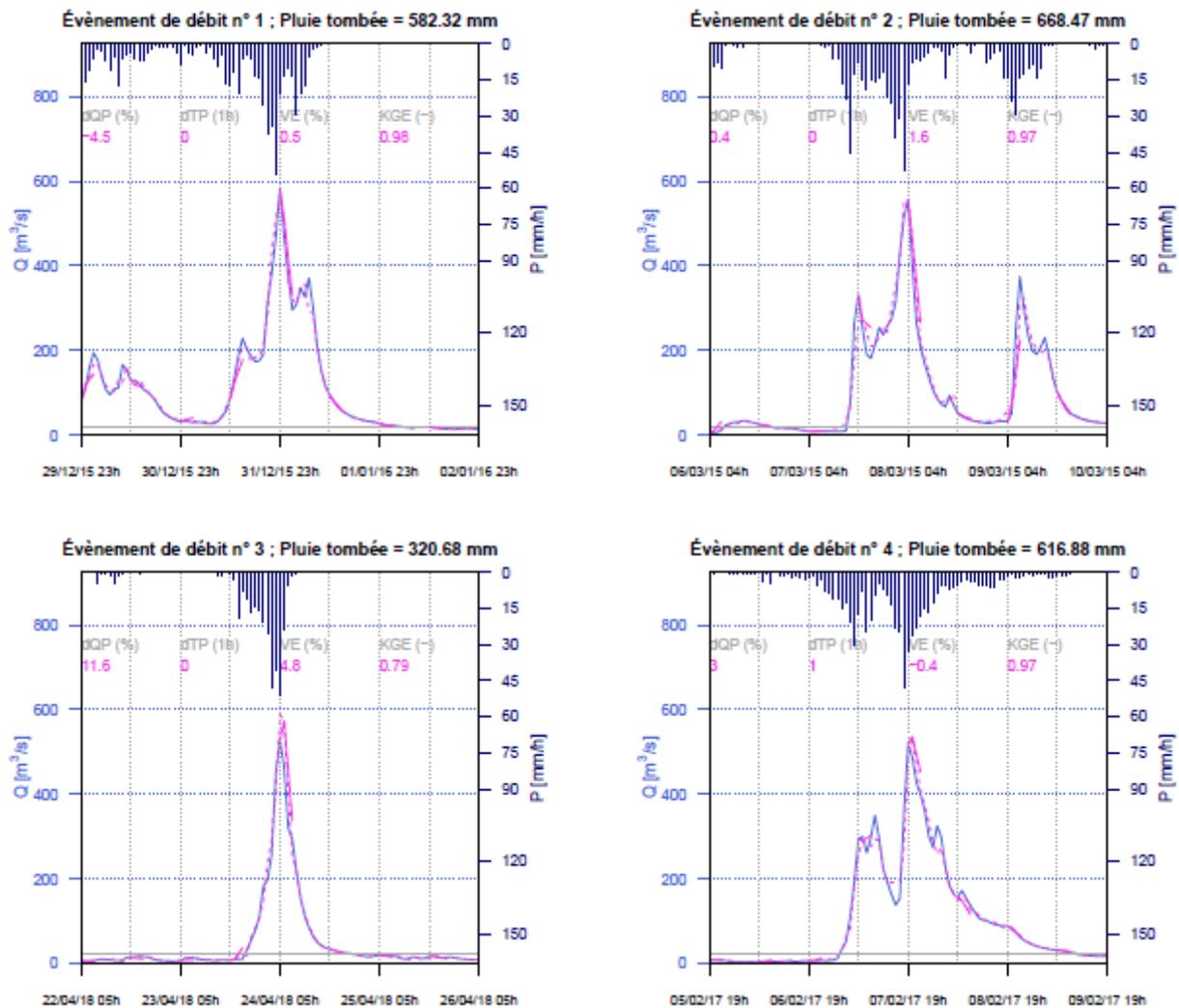


Figure 13 : Prévisions du modèle GRP à Marsouins - Bethleem (40120001) lors des évènements de 12/2015, 03/2015, 04/2018 et 02/2017

### c) 40130002 - Roches - Bassin La Paix

Le modèle GRP à Roches - Bassin La Paix (40130002) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0,88 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 25 m<sup>3</sup>/s

Tableau 14 : Scores de performance du modèle GRP à Roches - Bassin La Paix (40130002)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	3,45	0,686	66,9	62	32	600
Q90	10,74	0,692	57,9	50	36,7	461
Q95	19,77	0,699	50,2	51,9	32,6	347
Qvig retenu	25	0,707	58,3	45,2	39,4	277
Q99,9	168,1	0,792	47,6	33,3	38,5	26

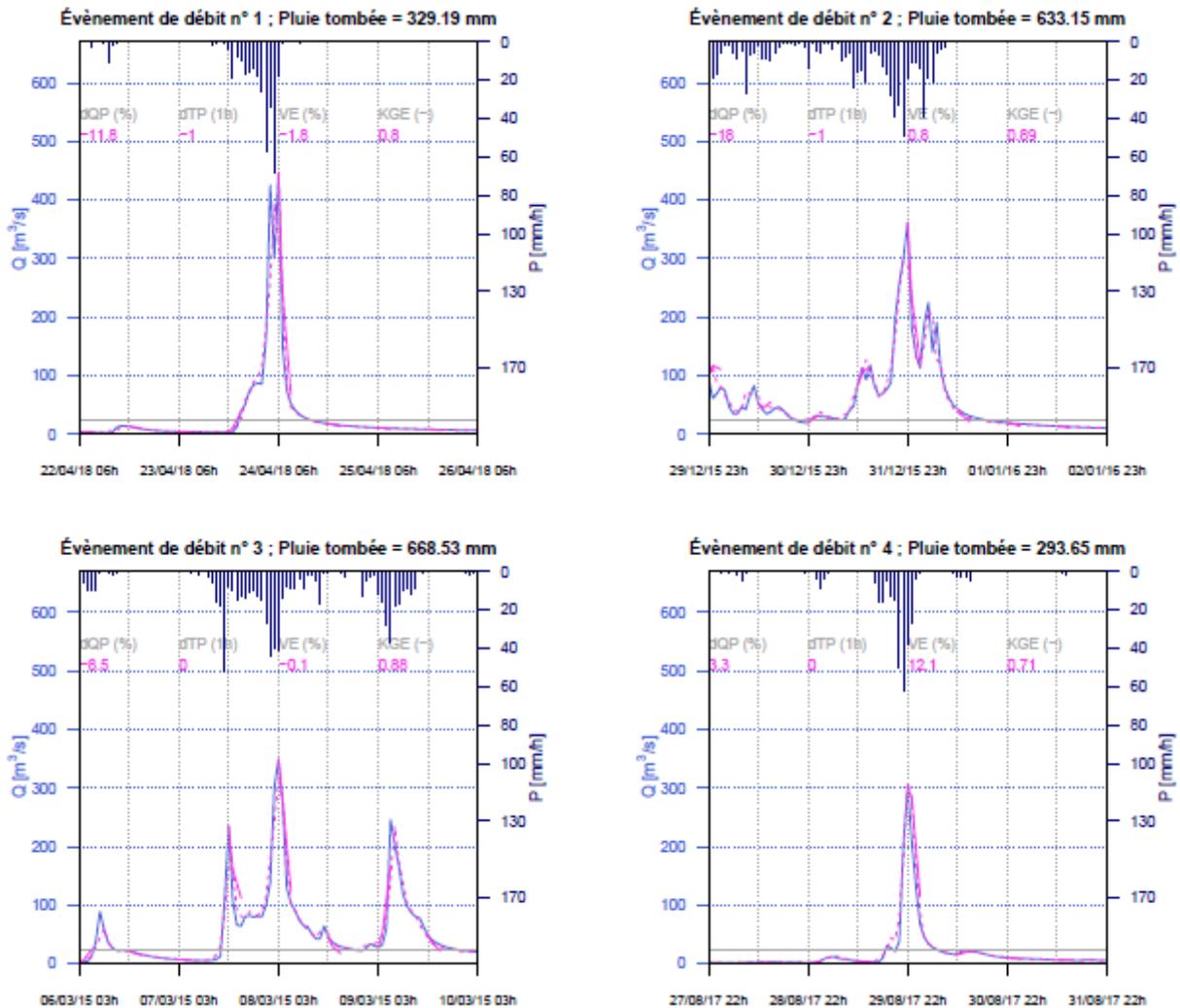


Figure 14 : Prévisions du modèle GRP à Roches - Bassin La Paix (40130002) lors des événements de 04/2015, 12/2015, 03/2015 et 08/2017

#### d) 40220001 - Mat - Barrage

Le modèle GRP à Mat - Barrage (40220001) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 4,12 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 400 m<sup>3</sup>/s

Tableau 15 : Scores de performance du modèle GRP à Mat - Barrage (40220001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	9,62	0,693	75	74	23,9	565
Q90	19,75	0,708	58,5	75,9	20,6	467
Q95	30,5	0,714	47	60,9	27,2	232
Q99,9	333,1	0,746	75	30,8	56,2	16
Qvig retenu	400	0,714	50	16,7	45,5	11

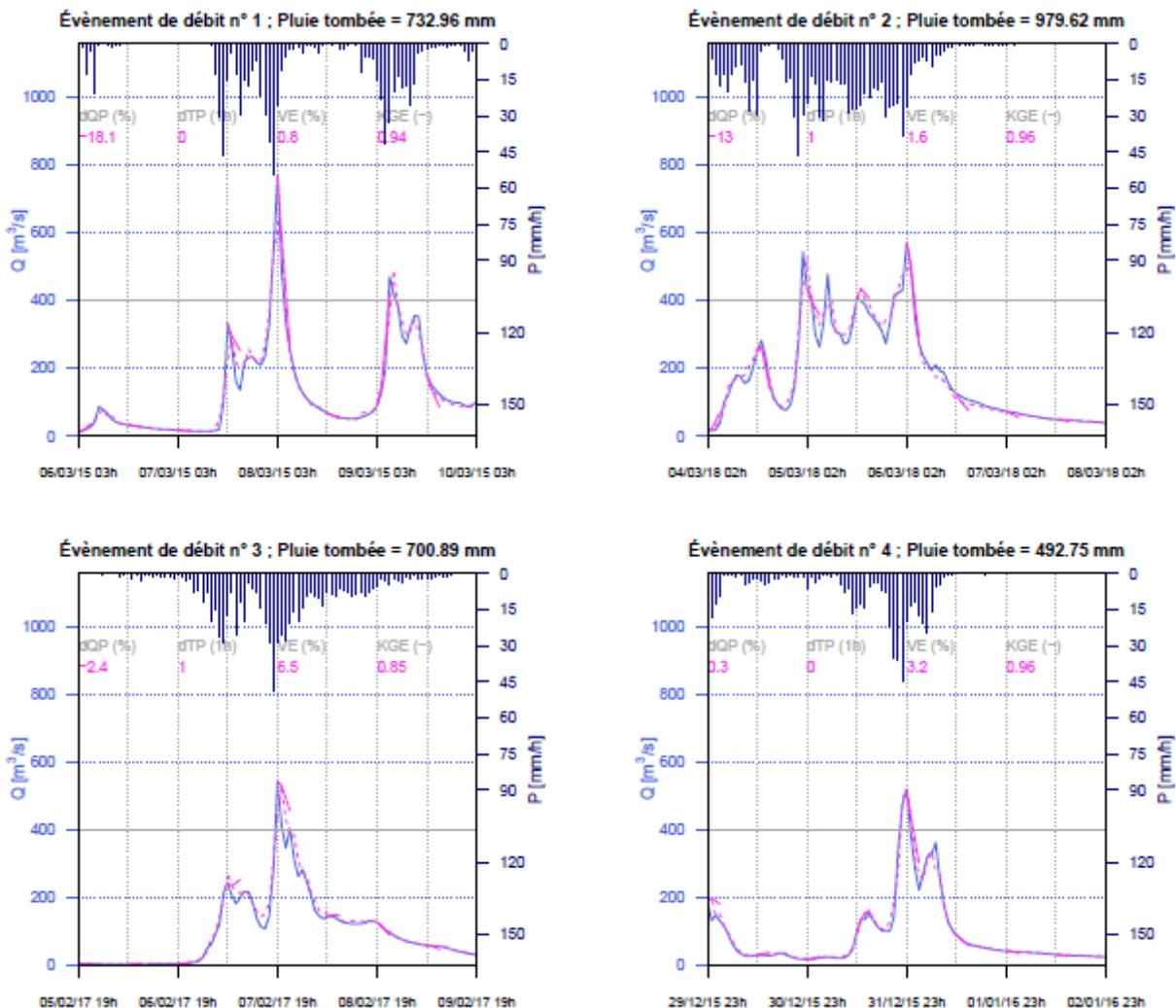


Figure 15 : Prévisions du modèle GRP à Mat - Barrage (40220001) lors des événements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 12/2015

e) 40300001 - Grande Saint-Jean - RN2002

Le modèle GRP à Grande Saint-Jean - RN2002 (40300001) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 28,5 m<sup>3</sup>/s

Tableau 16 : Scores de performance du modèle GRP à Grande Saint-Jean - RN2002 (40300001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,94	0,637	48,2	60,8	27,6	475
Q90	1,9	0,644	61,2	58,5	32,9	441
Q95	3,26	0,654	64,7	60,4	32,6	344
Qvig retenu	28,5	0,667	46,5	28,6	39,2	51
Q99,9	41,19	0,652	60	42,9	41,4	29

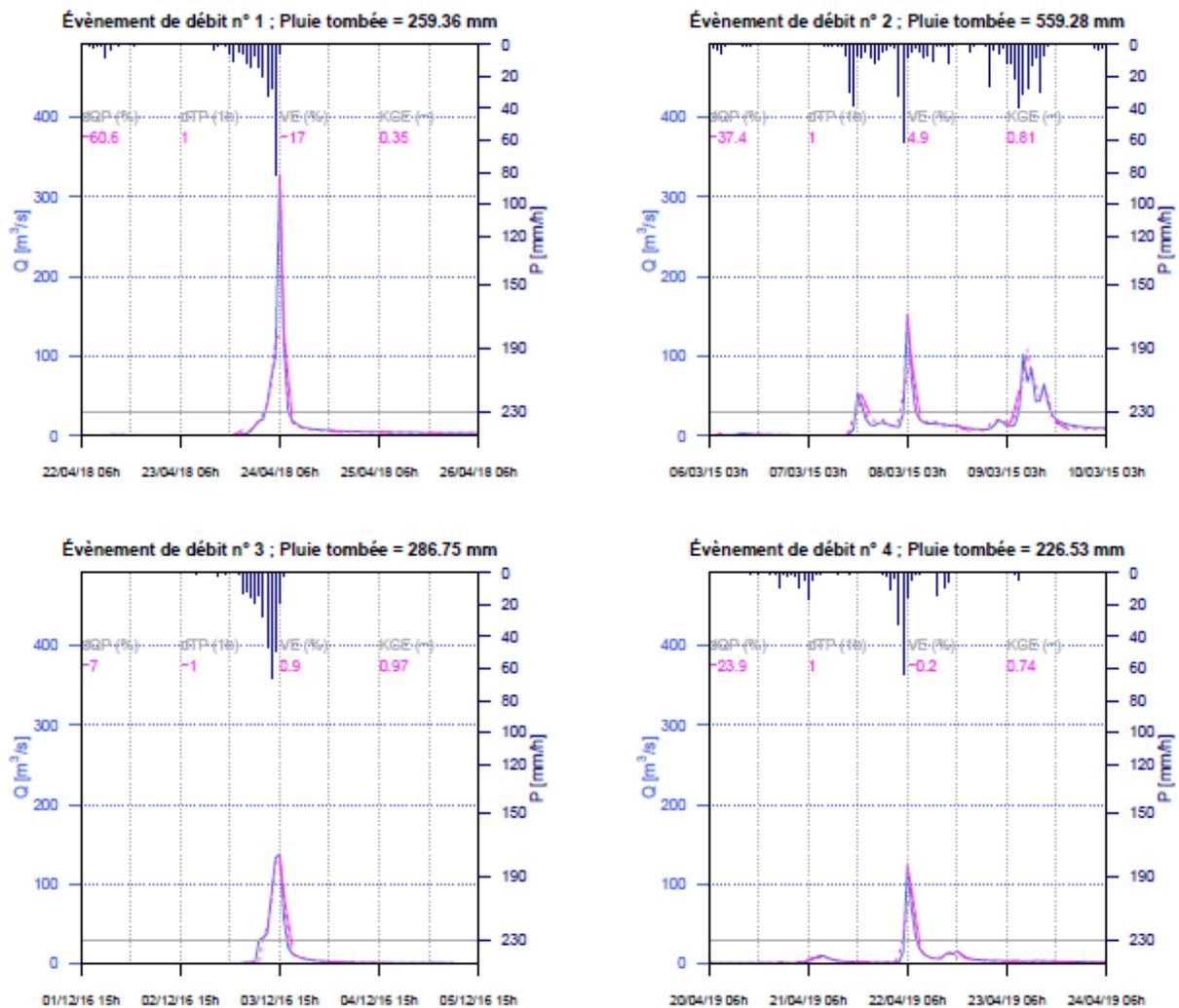


Figure 16 : Prévisions du modèle GRP à Grande Saint-Jean - RN2002 (40300001) lors des évènements de 04/2018, 03/2015, 12/2016 et 04/2019

### f) 40300003 - Petite Saint-Jean – Delice

Le modèle GRP à Petite Saint-Jean – Delice (40300003) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 1 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 16,5 m<sup>3</sup>/s

Tableau 17 : Scores de performance du modèle GRP à Petite Saint-Jean - Delice (40300003)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,45	0,681	46,1	78,8	17	488
Q90	0,77	0,691	48,6	74,3	20,2	435
Q95	1,04	0,706	47,8	74,4	20	385
Q99,9	14,95	0,769	44	8,3	42,3	26
Qvig retenu	16,5	0,773	38,1	11,1	36,4	22

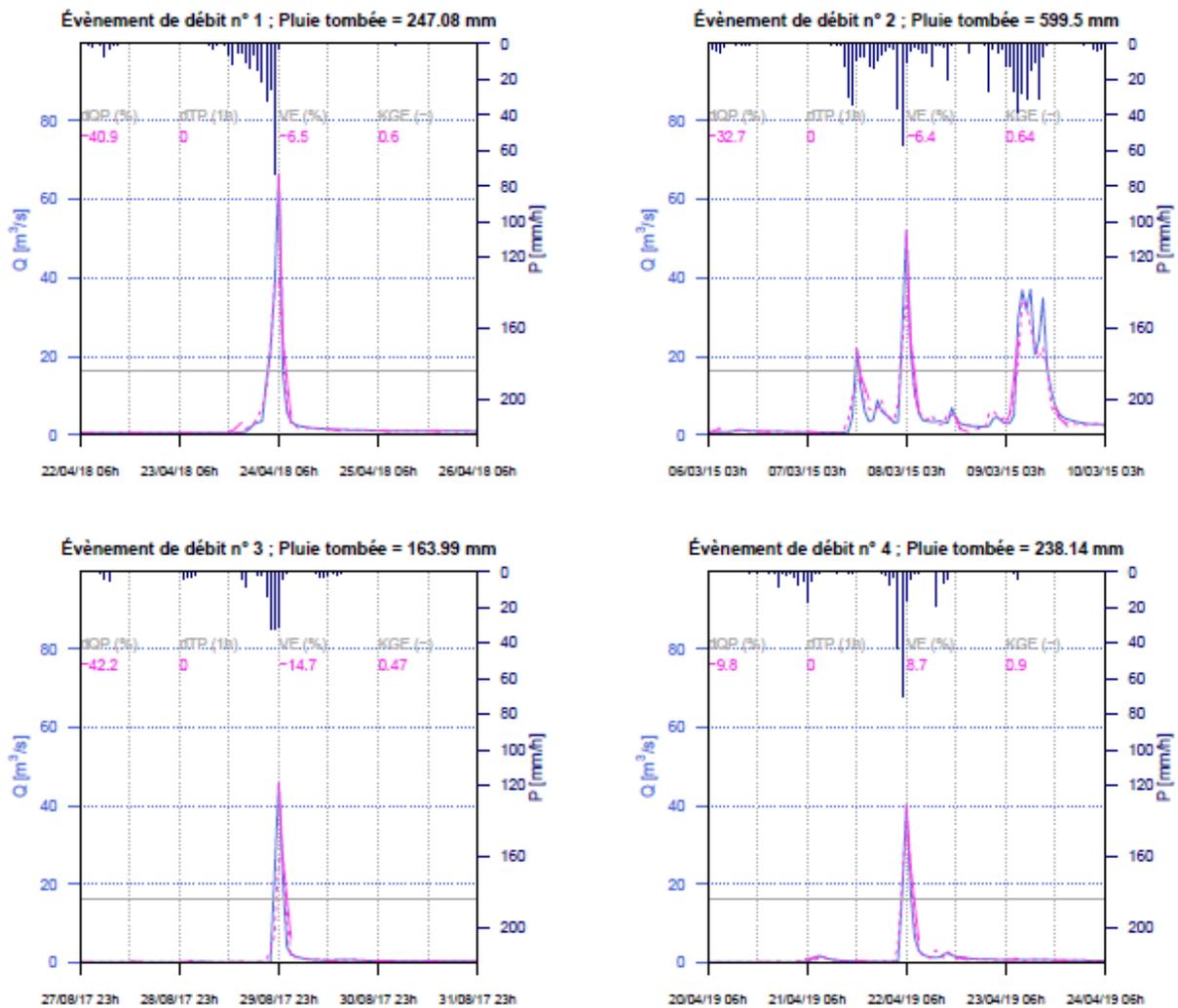


Figure 17 : Prévisions du modèle GRP à Petite Saint-Jean - Delice (40300003) lors des événements de 04/2018, 03/2015, 08/2017 et 04/2019

**g) 40300004 - Sainte-Suzanne - Niagara**

Le modèle GRP à Sainte-Suzanne - Niagara (40300004) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 65 m<sup>3</sup>/s

Tableau 18 : Scores de performance du modèle GRP à Sainte-Suzanne - Niagara (40300004)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,58	0,56	57,6	69,2	25,1	378
Q90	1,84	0,566	55,7	57	32	259
Q95	4,98	0,596	61,2	62,4	30,4	270
Qvig retenu	65	0,465	48,9	26,7	41,5	53
Q99,9	96,47	0,142	63,2	14,3	57,1	21

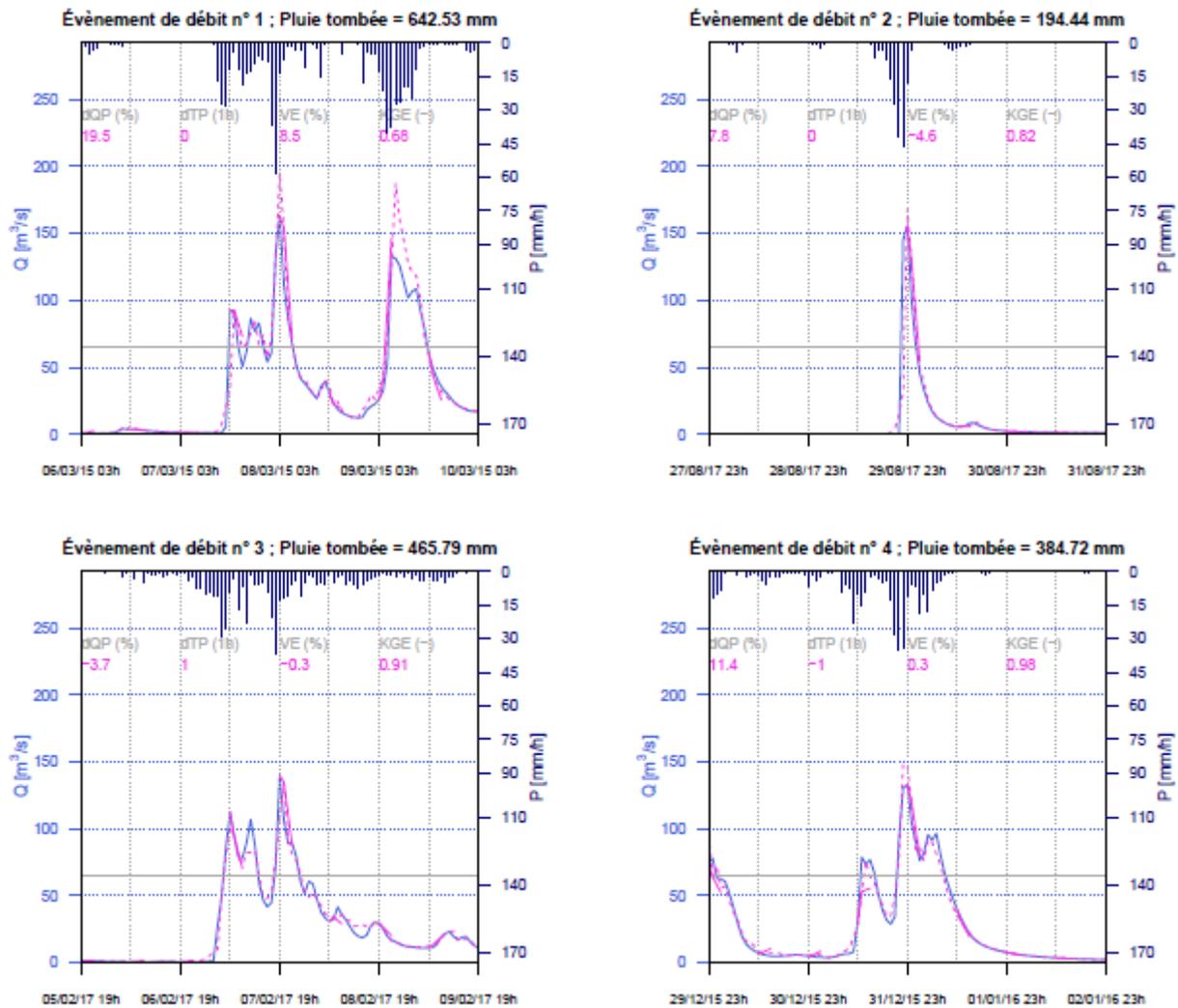


Figure 18 : Prévisions du modèle GRP à Sainte-Suzanne - Niagara (40300004) lors des événements de 03/2015, 08/2017, 02/2017 et 12/2015

## h) 40310001 - Pluies - Domenjod

Le modèle GRP à Pluies – Domenjod (40310001) 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 : TAN
- Horizon de calage : 1 h
- Seuil de calage : 0,08 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 40 m<sup>3</sup>/s

Tableau 19 : Scores de performance du modèle GRP à Pluies - Domenjod (40310001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,78	0,543	39,6	66,7	22,1	249
Q90	1,5	0,544	49,6	63,7	26,5	215
Q95	3,29	0,548	45,7	57,6	28,2	149
Qvig retenu	40	0,618	48,3	22,2	42,4	33
Q99,9	78,91	0,771	55,6	28,6	45,5	11

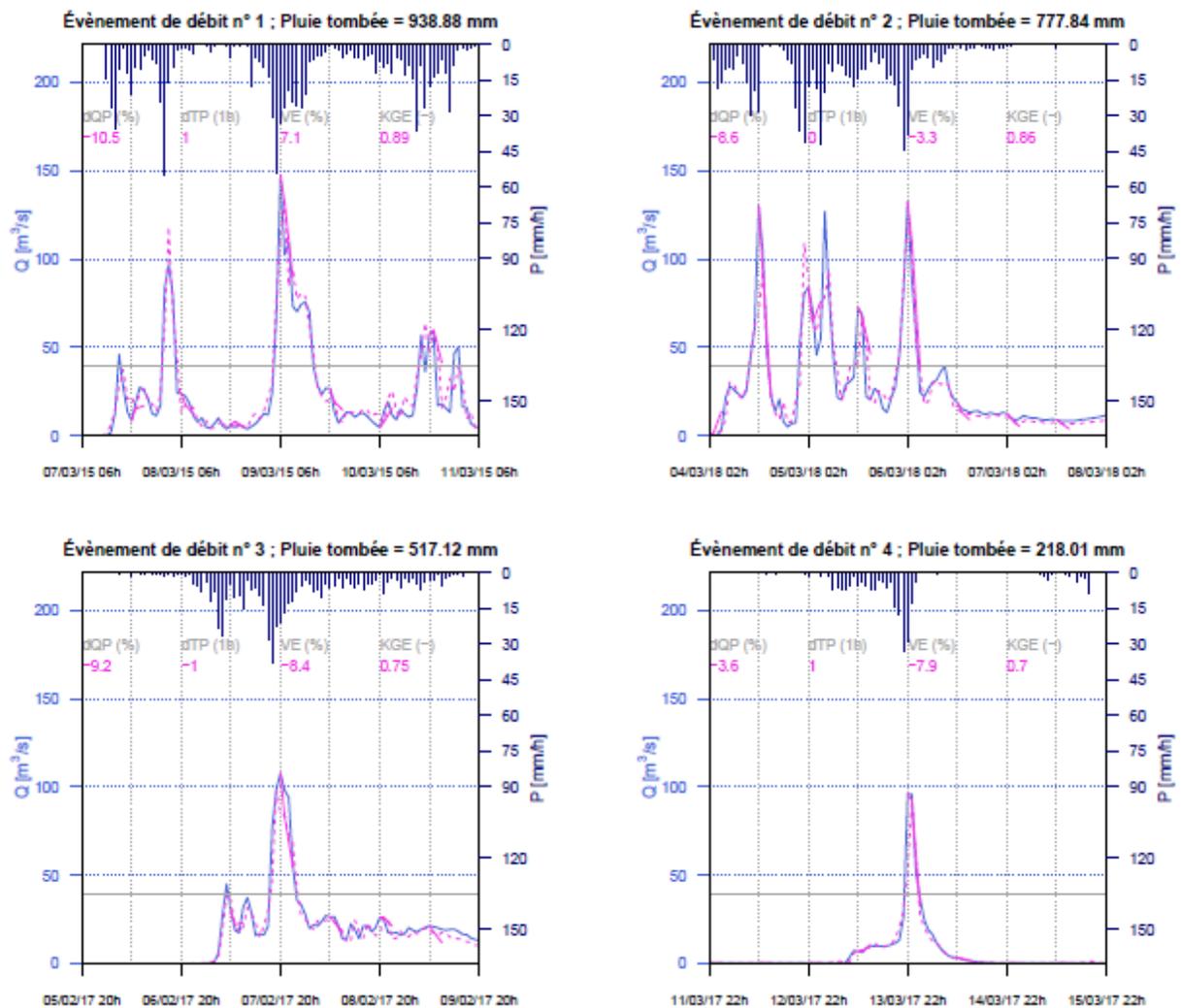


Figure 19 : Prévisions du modèle GRP à Pluies - Domenjod (40310001) lors des évènements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 03/2017

i) 40320001 - Durand - Velodrome

Le modèle GRP à Durand - Velodrome (40320001) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 7 m<sup>3</sup>/s

Tableau 20 : Scores de performance du modèle GRP à Durand - Velodrome (40320001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,01	0,543	23,4	92,6	6	252
Q90	0,09	0,535	22,8	83,8	10,5	124
Q95	0,24	0,539	25,3	62,5	17,8	118
Qvig retenu	7	0,627	83,3	28,6	62,5	8
Q99,9	21,15	NA	NA	NA	NA	NA

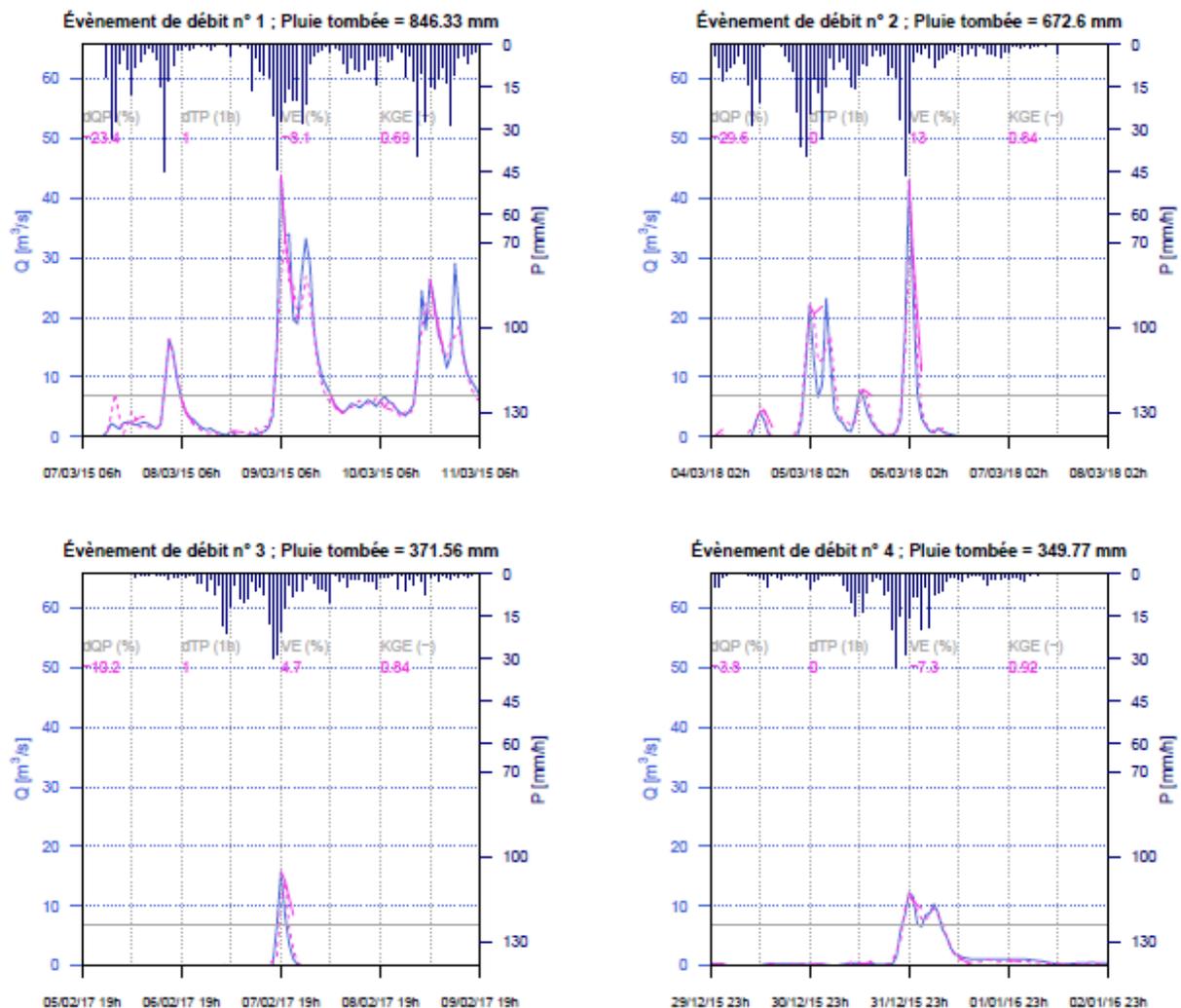


Figure 20 : Prévisions du modèle GRP à Durand - Velodrome (40320001) lors des évènements de 03/2015, 03/2018, 02/2017 et 12/2015

### j) 40320002 - Butor - Bowling

Le modèle GRP à Butor - Bowling (40320002) 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 : 1 h
- Seuil de calage :  $2 \text{ m}^3/\text{s}$
- Seuil de vigilance :  $40 \text{ m}^3/\text{s}$

Tableau 21 : Scores de performance du modèle GRP à Butor - Bowling (40320002)

	Qvig( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,86	0,737	50,3	65,1	25,9	382
Q90	1,53	0,748	37,6	55,6	25,6	250
Q95	2,22	0,755	41,9	64,7	23,7	274
Q99,9	28,2	0,795	78,6	15,4	68,8	16
Qvig retenu	40	0,806	81,8	10	75	12

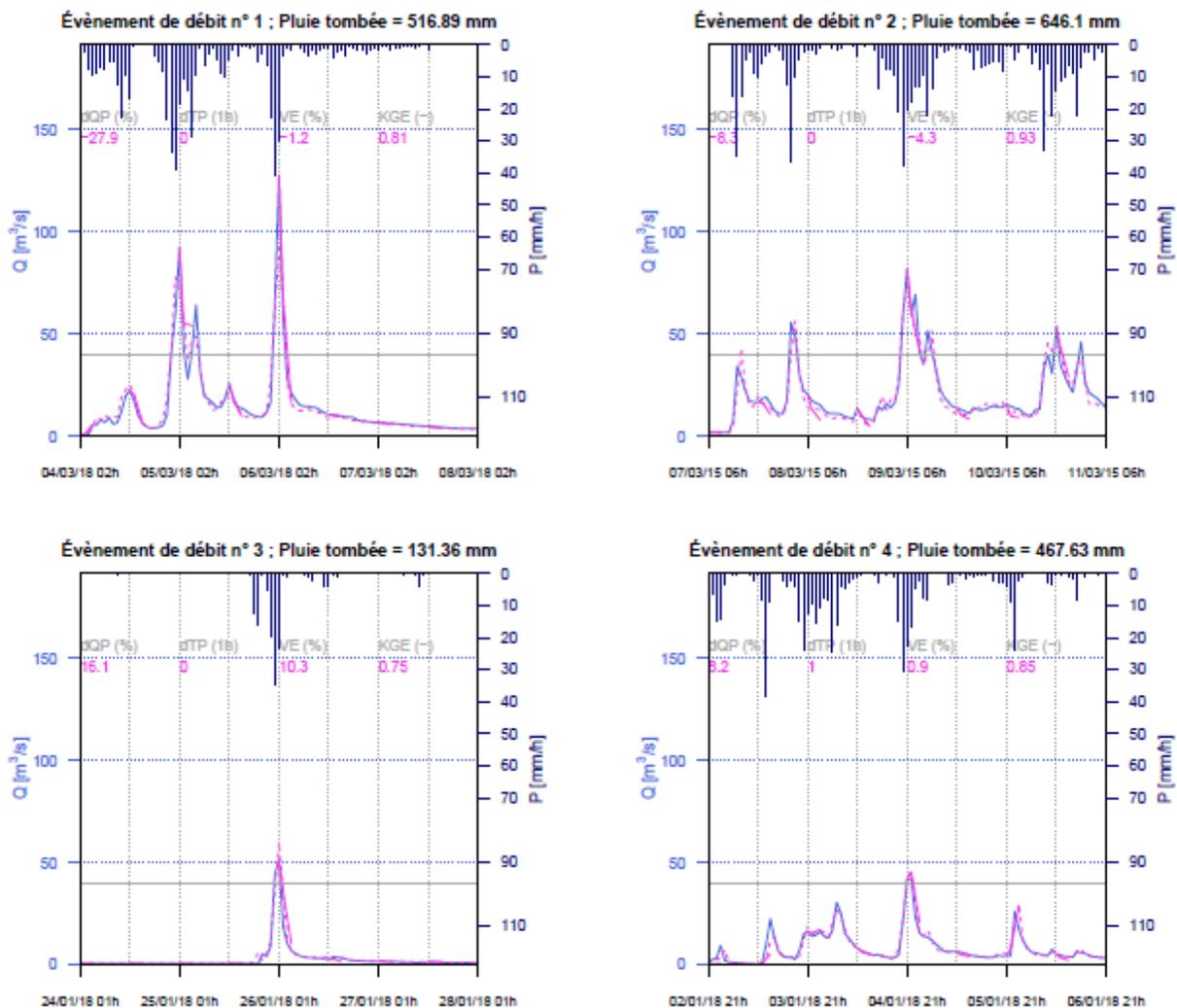


Figure 21 : Prévisions du modèle GRP à Butor - Bowling (40320002) lors des événements de 03/2018, 03/2015, 26/01/2018 et 04/01/2018

### k) 40320004 - Saint-Denis - Amont

Le modèle GRP à Saint-Denis - Amont (40320004) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 2,5 m<sup>3</sup>/s

Tableau 22 : Scores de performance du modèle GRP à Saint-Denis - Amont (40320004)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,79	0,676	75,3	79,2	19,5	657
Q90	1,07	0,678	68,4	75,9	21,7	369
Q95	1,52	0,694	70,6	65,9	29,9	241
Qvig retenu	2,5	0,714	66,3	57	35,3	156
Q99,9	44,17	0,688	81,8	30,8	60	15

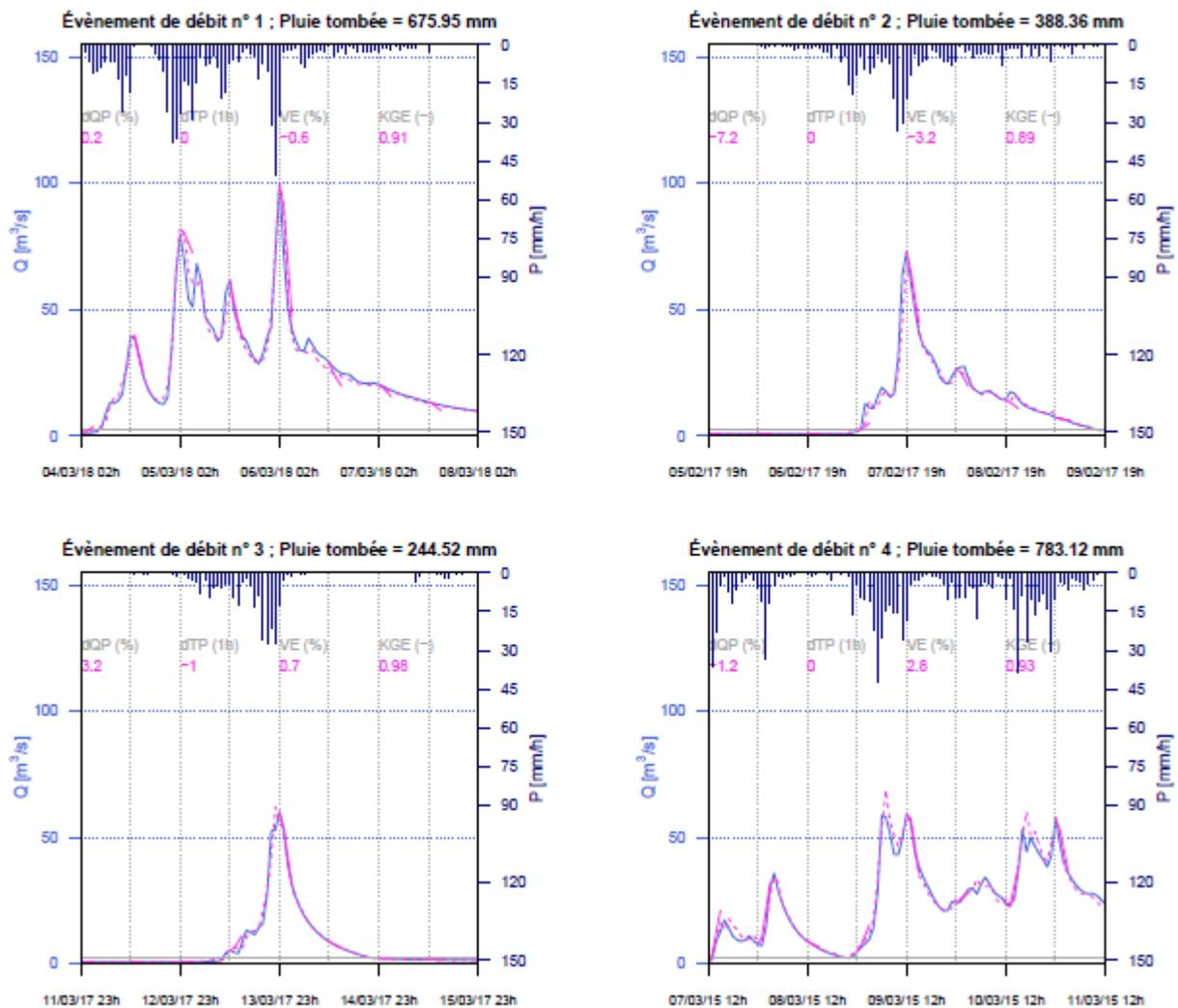


Figure 22 : Prévisions du modèle GRP à Saint-Denis - Amont (40320004) lors des événements de 03/2018, 02/2017, 03/2017 et 03/2015

### l) 40400001 - Galets - Barrage

Le modèle GRP à Galets - Barrage (40400001) 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 : 1 h
- Seuil de calage : 0,38 m<sup>3</sup>/s
- Seuil de vigilance : 50 m<sup>3</sup>/s

Tableau 23 : Scores de performance du modèle GRP à Galets - Barrage (40400001)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	1,66	0,663	61,5	80,9	17,1	281
Q90	3,38	0,669	56,9	71,3	23,6	174
Q95	4,41	0,671	41,8	79,3	16,1	143
Qvig retenu	50	0,679	75	20	63,2	19
Q99,9	106,66	0,712	28,6	50	22,2	9

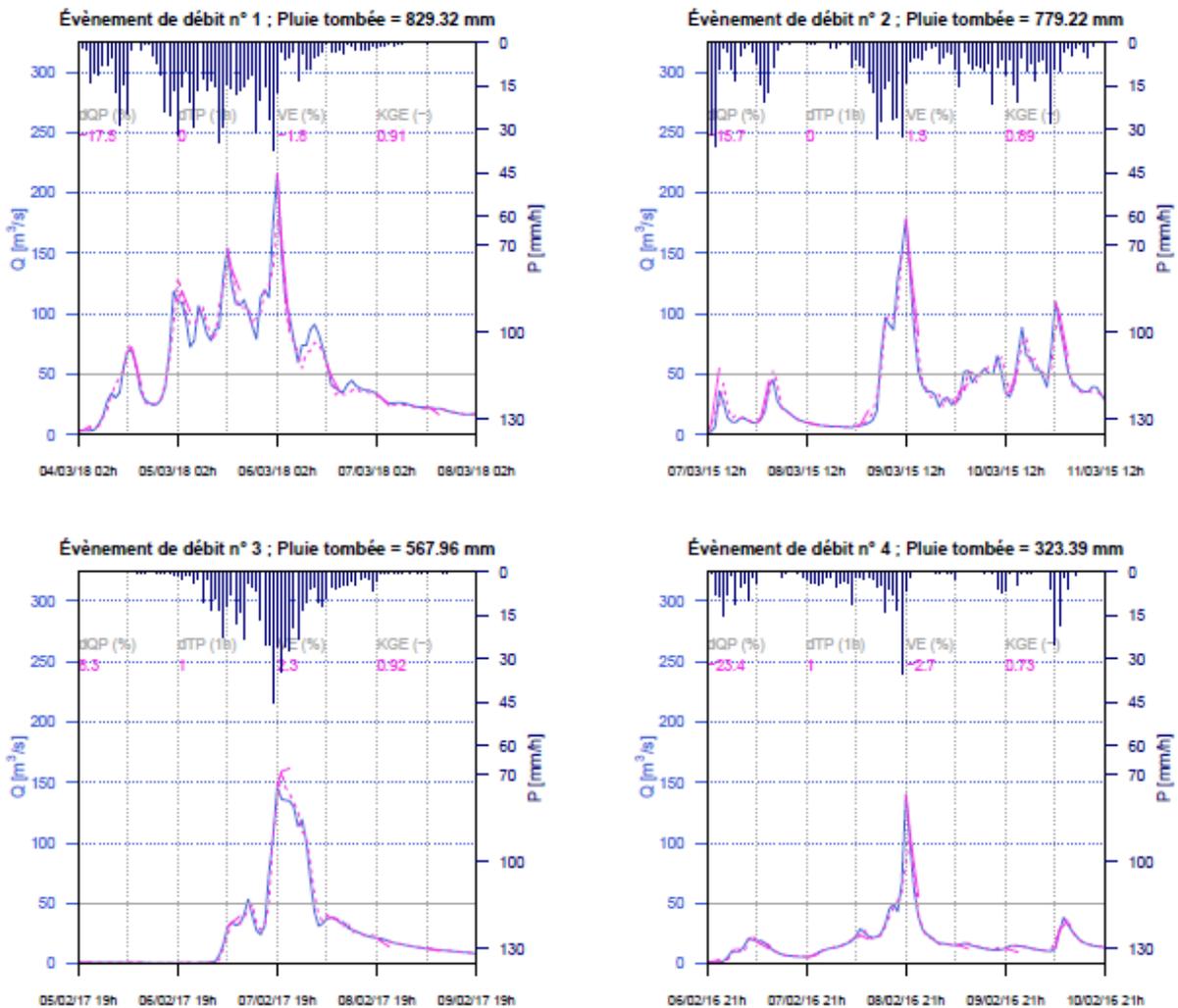


Figure 23 : Prévisions du modèle GRP à Galets - Barrage (40400001) lors des événements de 03/2018, 03/2015, 02/2017 et 02/2016

### m) 40620003 - Blanche - ZI1 Abattoir

Le modèle GRP à Blanche - ZI1 Abattoir (40620003) 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 : 2 m<sup>3</sup>/s

Tableau 24 : Scores de performance du modèle GRP à Blanche - ZI1 Abattoir (40620003)

	Qvig(m <sup>3</sup> /s)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	Nb données
Q75	0,01	0,754	24	79,7	12,4	1042
Q90	0,01	0,754	24	79,7	12,4	1042
Q95	0,01	0,754	24	79,7	12,4	1042
Q99,9	0,9	0,778	28,6	84,6	11,1	54
Qvig retenu	2	0,803	100	62,5	37,5	24

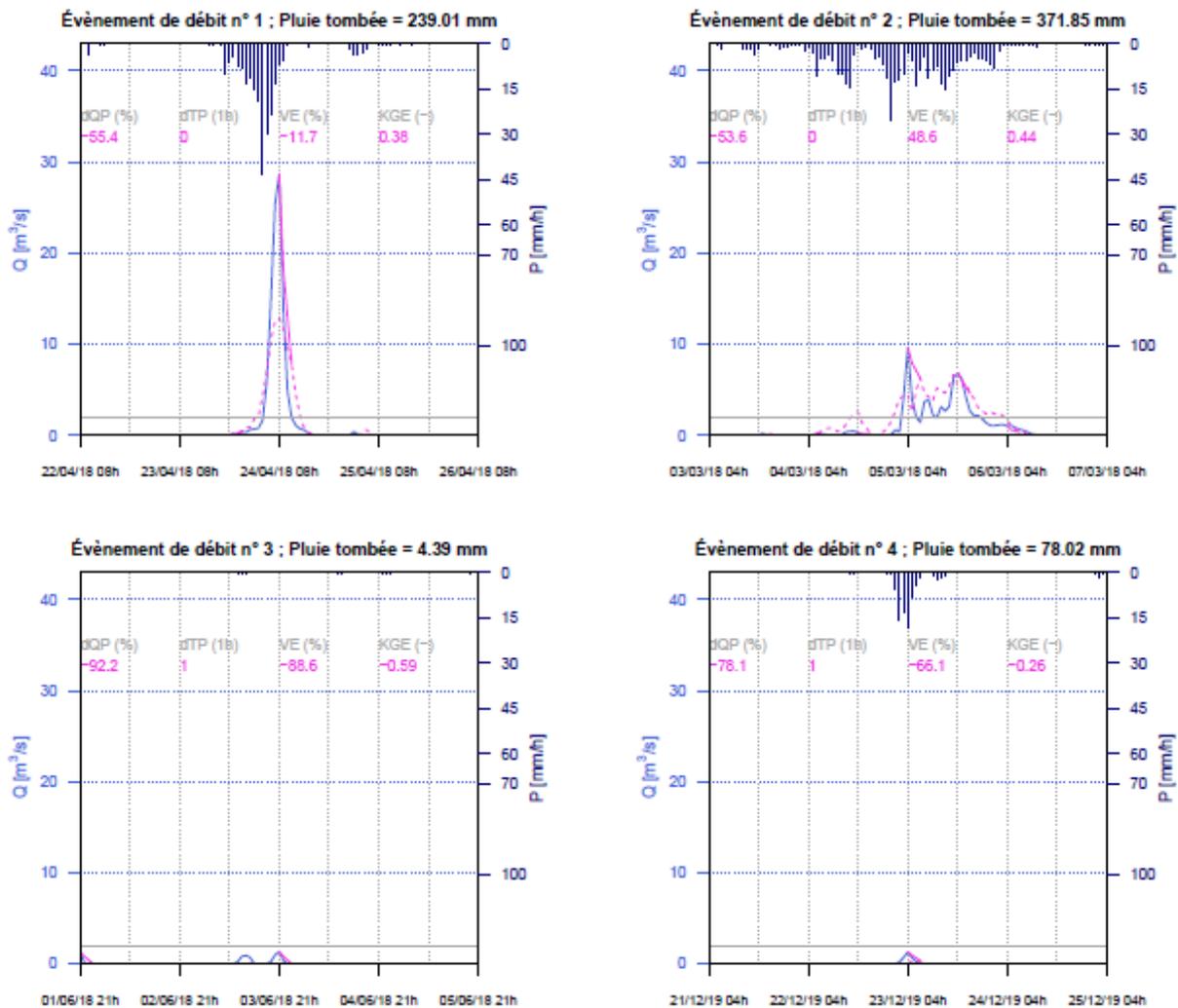


Figure 24 : Prévisions du modèle GRP à Blanche - ZI1 Abattoir (40620003) lors des évènements de 04/2018, 03/2018, 06/2018 et 12/2019

## 4.5. Création de la base de données temps réel

Le modèle a été calé à deux pas de temps différents : 15 minutes et 1 heure pour les 13 bassins étudiés sur la période complète 12/2014 – 01/2020 (l'année 12/2013 – 12/2014 étant utilisée pour l'initialisation du modèle). Malgré les mauvaises performances en calage pour certains bassins (notamment 40620003 - Blanche - ZI1 Abattoir), il a été décidé d'implémenter tous les bassins dans la chaîne opérationnelle.

Une étude des performances de prévision a posteriori sera menée pour valider les bassins retenus et éventuellement retirer les bassins pour lesquels la prévision est mauvaise (proposition de recalage du modèle ou abandon du modèle pour ces bassins).

## 5. Discussion

L'étude de Viatgé (2019), constituant la première analyse du modèle GRP appliqué aux bassins réunionnais, 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 13 bassins versants sélectionnés par la CVH.

Le Tableau 25 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 jugions 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. Dans le tableur joint (voir feuille COMPARAISON\_SEUILS\_VIATGE), 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.

En conclusion, il apparaît que GRP donne des performances satisfaisantes pour 10 des 13 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).

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 13 bassins versants, un retour d'expérience sera mené en fin d'année 2021 pour évaluer le modèle GRP en réalisant des rejeux des évènements les plus importants depuis cette mise en place opérationnelle.

Tableau 25 : 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 évènements 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 évènements de crue. Sous-estimation des débits très importants (> à 750 m <sup>3</sup> /s).

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
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		
			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. En effet, le critère de persistance est assez moyen et les taux de fausses alertes restent particulièrement élevés.
			0,585	28,9	72,5	16,4		
			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. 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.
			0,48	36	74,9	17,4		
			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. 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 paraît plus intéressant à exploiter avec les données radars.
			0,45	46,2	89,3	9,5		
			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)

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
40320002	Butor - Bowling	16,86	0,006	16	66,3	12,2	0,3	Les performances du modèle sont jugées moyennes sur ce bassin. 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 paraît plus intéressant à exploiter avec les données radars et totalement inexploitable avec les postes pluviométriques.
			0,516	16,5	64,9	12,6		
			0,824	81,8	10	75	40	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle reproduit bien les évènements de crue. Sous-estimation pour les très hauts débits (> à 100 m <sup>3</sup> /s)
40320004	Saint-Denis - Amont	27,01	0,274	35,6	63,2	22,1	0,8	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.
			0,576	38,9	75,3	17,8		
			0,715	65,1	58,1	34,2	2,5	Les performances du modèle sont satisfaisantes. Le modèle réagit très bien aux évènements 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 évènements 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 plaine Tampon/St-Pierre et pluies essentiellement concentrées en amont du bassin versant (Plaine des Cafres / hauts du Tampon).

## 6. Mise en place opérationnelle de GRP

Météo-France a mis à disposition de la CVH un serveur permettant d'implémenter GRP de manière opérationnelle et d'assurer le rapatriement des données de précipitations observées et prévues en temps réel. Dans cette partie, la mise en place opérationnelle de GRP sur ce serveur sera présentée.

### 6.1. Création de la base de données temps réel

Afin de bien distinguer les deux pas de temps de fonctionnement du modèle et pour faciliter l'alimentation en temps réel avec les précipitations observées, deux dossiers ont été créés : *GRP\_infrahoraire* pour le pas de temps 15' et *GRP\_horaire* pour le pas de temps horaire.

Dans un premier temps, la base de calage (dossiers 00\_BDD\_CVH\_15min et 00\_BDD\_CVH\_1h) et les fichiers nécessaires au calage de GRP (dossier \00\_GRP\_v2018\Parametrage) ont été déposés sur le serveur dans le dossier propre au pas de temps du modèle. En repartant de la configuration optimale décidée pour chaque bassin, le calage complet avec création de la base de données temps réel a été lancé (exécutable 04-Creation\_Base\_Temps\_reel\_GRP.exe). La base de données temps réel est ainsi créée dans les dossiers :

- *./GRP\_infrahoraire/00\_BDDTR\_Reunion\_15mn/* pour le pas de temps 15 minutes,
- *./GRP\_horaire/00\_BDDTR\_Reunion\_1H/* pour le pas de temps horaire.

### 6.2. Paramétrage du modèle GRP

Lors de la création de la base de données temps réel, le paramétrage du modèle est réalisé de manière automatique. Cependant, l'utilisateur a la possibilité de modifier certains paramètres à l'aide des fichiers présents dans le dossier *Parametrage* de la base de données Temps Réel.

#### 6.2.1. Fichier Config\_Prevision.txt

Ce fichier donne les chemins de fichiers d'entrée/sortie et des modalités de fonctionnement du modèle GRP en prévision. C'est dans ce fichier qu'il convient d'indiquer le nombre de scénarios à utiliser et les codes modèles correspondants. Dans le cas de l'implémentation opérationnelle sur les bassins réunionnais, trois scénarios de prévision sont disponibles pour GRP (AROME min, moy et max). Ainsi, la balise #SCENBR# a été modifiée et fixée à 3 (noter « **003** »). Les codes modèles (balise #CODMOD#) correspondants aux différents scénarios sont numérotés 0001, 0002 et 0003 (noter « **0001;0002;0003**; »).

La balise #CONFIR# a également été modifiée (valeur = **NON**) pour forcer la fermeture de la fenêtre en fin de prévision.

#### 6.2.2. Fichier LISTE\_Bassins.DAT

Ce fichier contient la liste des stations hydrométriques pour lesquelles on souhaite faire une prévision. Par défaut, l'horizon maximal de prévision (colonne HORMAX) est fixé à son maximum (5 jours pour les pas de temps infra-journaliers). Les colonnes HOR1 et HOR2 (remplies par défaut respectivement à 1 jour et à l'horizon de calage) sont utilisés pour la création d'un fichier Histo\_Prev\_HOR1\_HOR2\_XXXXXXXX\_nnJnnHnnM avec XXXXXXXX le code de la station hydrométrique et nnJnnHnnM le pas de temps du modèle. Ce fichier contient la prévision réalisée par le modèle GRP à ces deux horizons 1 jour avant l'instant de prévision.

Les colonnes VIG1, VIG2 et VIG3 correspondent généralement aux seuils de vigilance jaune, orange et rouge des stations hydrométriques. Par défaut, la valeur VIG1 est remplie avec la valeur du seuil de vigilance utilisé en calage, les colonnes VIG2 et VIG3 étant remplies avec la valeur -999,9.

Les colonnes suivantes sont destinées au programme d'abaques de dépassement de seuils. Pour utiliser ce programme, il est nécessaire de fournir 3 valeurs de seuils de vigilance et de modifier la colonne « A » (noter 1 au lieu de 0) pour permettre l'activation du programme pour le bassin en question. La colonne ECH correspond à l'échéance jusqu'à laquelle les prévisions vont être produites. Elle est limitée à 5 jours aux pas de temps infra-journaliers. Les colonnes CMX, IX et DI (respectivement cumul max, intensité max et durée d'intensité) permettent de définir les paramètres du programme d'abaques. Par défaut, elles sont fixées à -99, -9 et 1. Si les colonnes CMX et IX ne sont pas modifiées, le programme calculera lui-même ces valeurs à l'aide de la chronique observée.

Enfin, la dernière colonne INC permet d'activer le module de calcul d'incertitudes si le modèle a été calé avec cette option.

### 6.3. Organisation opérationnelle

#### 6.3.1. Mise à disposition des données de précipitations observées et prévues et de débits

Deux produits de précipitations observées fournis par Météo-France sont disponibles pour l'alimentation de GRP en temps réel.

- Un produit ANTILOPE 15' permettant d'alimenter le modèle au pas de temps 15'.
- Un produit horaire « lame d'eau BEST » correspondant à 3 cumuls ANTILOPE 15' + dernier cumul PANTHERE, permettant d'avoir accès plus rapidement à la donnée horaire.

Ces données d'observation en temps réel nécessitent un prétraitement avant fourniture sur le serveur AIGA-FTP. Ceci conduit à un délai entre l'heure de l'observation et la mise à disposition de la donnée finale (voir Tableau 26). Ce délai doit être pris en considération lors de la mise en place opérationnelle du modèle GRP.

Tableau 26 : Description des produits météo utilisés pour l'alimentation en temps réel du modèle GRP

Produit	Réf. Hor	Description (pp : précipitation)	PDT donnée brute	Agrégation du PDT (produit par MF)	Temps théorique de mise à disposition	Mise à disposition sur AIGA_FTP (estimé)
LAMEBEST_LameBV_1H	TU	Cumul des trois 1ères lames d'eau ANTILOPE 15' (45 min) + lame d'eau PANTHERE 15' pour le dernier 1/4 d'heure => gain de temps de mise à disposition de la lame d'eau	15'	Cumul 1H mis à disposition au pdt 15'	+ 10'	+10 à 13'
ANTILOPE_LameBV_15MN	TU	Observation (radar) des pp, par BV, à/p de la lame d'eau ANTILOPE (= PANTHERE + pluviomètres).	15'	NON	+ 10'	+10 à 13'

Le référentiel temporel utilisé pour les données temps réel est le référentiel TU (Heure Locale Réunion – 4h). C'est le référentiel utilisé par GRP dans son utilitaire de prévision.

Les prévisions AROME Océan Indien fournies par Météo-France sont utilisées pour définir les scénarios de prévision de GRP. Deux produits sont disponibles : AROME 1h et AROME 3h. Chaque produit contient trois scénarios différents : minimum, moyen et maximum (voir partie 2.3.1). Dans l'attente de méthodes de désagrégation de la donnée au pas de temps 3h pour les modèles GRP calés, le produit AROME 1h sera utilisé.

Les données de précipitations prévues AROME nécessite un temps de prétraitement beaucoup plus long que les données observées (voir Tableau 27). Ce temps de mise à disposition conduit à l'utilisation par GRP du dernier fichier déposé sur le serveur AIGA\_FTP afin de disposer de l'échéance de prévision la plus lointaine possible. Le référentiel temporel des données AROME est le référentiel TU.

Tableau 27 : Temps de mise à disposition des données de précipitations prévues AROME 1h

Lancement des runs AROME à MF Toulouse (UTC)	06h	12h	18h	00h
Délai de disponibilité avant déclenchement du calcul par BV : 6h + 2h de sécurité				
Déclenchement à MF OI du calcul des lames d'eau par Bassin Versant (UTC)	14h	20h	02h	08h
Dépôt des derniers fichiers AROME 1H sur AIGA_FTP (HL)	18h30	00h30	06h30	12h30
Import planifié (HL)	18h35	00h35	06h35	12h35

Les données de débits sont importées depuis le logiciel AQUAREEL utilisé à la CVH. Les données de hauteur d'eau sont rapatriées de manière quasi-instantanée par le logiciel qui convertit ces données en débit à l'aide des courbes de tarage estimées par les hydromètres de la CVH. La fréquence d'acquisition des données est de 5 minutes. Un export vers le serveur sur lequel est implémenté GRP est réalisé chaque minute afin de disposer dès que possible de la dernière valeur de débit disponible.

### 6.3.2. Stratégie de prévision

Différents outils ont été mis en place pour assurer un fonctionnement optimal et une alimentation la plus complète possible du modèle pour la prévision en temps réel.

Dans cette partie, l'organisation du serveur et l'enchaînement des différentes étapes pour parvenir à une prévision seront détaillées.

Sur le serveur hébergé par Météo-France, un dossier GRP a été créé. Il contient :

- Quatre dossiers
  - o **donnees\_temps\_reel** pour toutes les données relatives à l'alimentation en temps réel du modèle GRP aux pas de temps 15 minutes et 1 heure,
  - o **grp\_horaire** qui contient le modèle GRP au pas de temps 1 heure,
  - o **grp\_infrahoraire** qui contient le modèle GRP au pas de temps 15 minutes,
  - o **import** contenant les tâches d'import des fichiers de précipitations (observées et prévues),
- Trois scripts pour le lancement de GRP
  - o **calcul\_1h.R** pour le lancement de la prévision au pas de temps horaire,
  - o **calcul\_15min.R** pour le lancement de la prévision au pas de temps 15 minutes,
  - o **calcul\_tot.R** pour le lancement en parallèle des 2 scripts mentionnés ci-dessus.
- Un fichier batch **calcul\_grp.bat** permettant le lancement automatique via une tâche planifiée du programme **calcul\_tot.R**

Pour réaliser une prévision avec le modèle GRP, une succession d'opérations est nécessaire :

- 1) L'importation des données de précipitations (temps réel et prévision) – dossier import

Cette opération est réalisée via les tâches planifiées faisant appel aux fichiers **import\_arome\_1h.bat** et **import\_ANTILOPE\_BEST.bat**. Ces fichiers permettent d'aller récupérer la dernière donnée disponible sur le serveur AIGA\_FTP.

Pour l'import des données observées, le code **import\_ANTILOPE\_BEST.R** met à jour le fichier **import\_ANTILOPE\_BEST.txt** afin de lui spécifier les fichiers ANTILOPE 15' et LAME\_BEST à aller récupérer pour lancer la prévision à venir. Si les fichiers ne sont pas disponibles, le programme s'arrête et l'import sera réalisé à la prochaine itération de la tâche. Si les fichiers sont disponibles, ils sont copiés dans le dossier **donnees\_temps\_reel** et renommés **AntilopeBV15MN.csv** et **AntilopeBV1H.csv** respectivement pour l'alimentation de GRP aux pas de temps 15' et 1h.

Pour l'import des données de précipitations prévues, le script **import\_arome\_1h.bat** réalise la copie les fichiers **AROME.1H.min.txt**, **AROME.1H.moy.txt** et **AROME.1H.max.txt** dans le dossier **donnees\_temps\_reel**. Pour l'instant, les données AROME 3h ne sont pas utilisées. Une étude devra déterminer si l'utilisation de ces données plutôt que les données AROME 1h permet d'améliorer la prévision avec le modèle GRP.

La tâche d'import des données observées ANTILOPE/BEST est lancée toutes les 5 minutes alors que la tâche d'import des données prévues AROME est lancée toutes les heures. Le Tableau 28 rappelle les heures de lancement du code **import\_ANTILOPE\_BEST.R**.

Les données de débits observés sont importées depuis le logiciel AQUAREEL de la CVH dans le référentiel temporel Heure Locale (Réunion). Ces données à pas de temps fixe (5 minutes) sont rapatriées chaque minute via une tâche planifiée et alimentent le fichier **debit.csv**. Une archive d'une profondeur de 5 jours est importée à chaque appel de la tâche planifiée.

## 2) Le contrôle des données importées – dossier donnees\_temps\_reel

Il est possible que l'import des données de précipitations observées et prévues soit défectueux pour différentes causes : problème d'alimentation, erreur d'écriture dans le fichier, donnée non disponible lors de l'import, etc. Afin d'éviter des problèmes de fonctionnement de GRP, il est nécessaire de contrôler la donnée importée avant d'alimenter GRP. Différents contrôles ont été mis en place dans la chaîne opérationnelle dans les codes **conversion\_observations.R** et **conversion\_previsions.R** :

- Les problèmes de lecture : si le programme ne parvient pas à lire le fichier importé, un message d'erreur est renvoyé dans le fichier **Erreur\_meteo.txt**. Il spécifie la date et le nom du fichier ne pouvant être lu.
- L'absence de données : chaque fichier de précipitations observées est supposé contenir 19 lignes (une par bassin versant pour l'heure importée) et 4 colonnes (heure importée, nom du bassin, identifiant de bassin Météo-France et pluie observée sur le dernier pas de temps). Parfois, cette dernière colonne est vide pour une ou plusieurs lignes. Le programme supprime ces lignes et un message d'erreur est renvoyé dans le fichier **Erreur\_meteo.txt**.
- Les données non numériques : la valeur renvoyée lors du calcul de la pluie de bassin est parfois erronée (ex : pluie observée = 0..5 mm). Ces erreurs d'écriture pouvant conduire à des problèmes de fonctionnement de GRP sont gérées par le code qui supprime ces lignes et un message d'erreur est renvoyé dans le fichier **Erreur\_meteo.txt**.
- Les données aberrantes : les fichiers d'observations et de prévisions peuvent contenir des données aberrantes. De plus, une lacune lors de la prévision AROME est remplacée par 99999 dans le fichier fourni par Météo-France. Une valeur seuil a été définie pour les deux pas de temps de GRP utilisés (valeur seuil de 75 mm pour le pas de temps 15 min, de 300 mm pour le pas de temps horaire). Lorsqu'une valeur dépasse ces seuils, un message d'avertissement est produit et les lignes sont ignorées lors de la production des fichiers d'alimentation de GRP.
- L'absence de données de débit à l'instant de prévision : pour une assimilation complète à l'instant de prévision, il est nécessaire de disposer, dans la base de données temps réel de GRP, des deux derniers débits observés (pour la mise à jour du réservoir de routage et le calcul de la correction de l'erreur). En cas d'absence de débits à l'instant de prévision, le code renvoie un message d'erreur dans le fichier **Erreur\_GRP.txt**. Lorsque l'alimentation en débit est rétablie, un message avertit l'utilisateur dans ce même fichier.

En complément de ces avertissements reportés dans le fichier texte, une adresse mail a été créée pour alerter instantanément les prévisionnistes de la CVH lors d'un défaut d'alimentation du modèle.

### 3) Le formatage des données et l'alimentation du modèle GRP – dossier donnees\_temps\_reel

Lorsque les fichiers ont été contrôlés et le nettoyage des fichiers a été réalisé, les données validées sont converties au format GRP et regroupées pour tous les bassins versants selon leurs types à l'aide des scripts **conversion\_observations.R** et **conversion\_previsions.R**.

Ne disposant pas de scénario de précipitations prévues au pas de temps 15', une méthode simple de désagrégation a été implémentée en répartissant la donnée horaire issue des fichiers AROME 1h sur quatre quarts d'heure consécutifs pour la production de scénarios au pas de temps 15'.

L'exécution de ces deux scripts alimente les dossiers :

- GRP\_infracoraire/00\_BDDTR\_Reunion\_15mn/Temps\_Reel/Entrees avec les fichiers suivants :
  - o Debits.txt
  - o Pluies\_Antilope\_00J00H15M.txt
  - o Scen\_001\_Pluies\_AROMEI\_MIN\_00J00H15M.txt
  - o Scen\_002\_Pluies\_AROMEI\_MOY\_00J00H15M.txt
  - o Scen\_003\_Pluies\_AROMEI\_MAX\_00J00H15M.txt
- GRP\_horaire/00\_BDDTR\_Reunion\_1H/Temps\_Reel/Entrees avec les fichiers suivants :
  - o Debits.txt
  - o Pluies\_BEST\_00J01H00M.txt
  - o Scen\_001\_Pluies\_AROMEI\_MIN\_00J01H00M.txt
  - o Scen\_002\_Pluies\_AROMEI\_MOY\_00J01H00M.txt
  - o Scen\_003\_Pluies\_AROMEI\_MAX\_00J01H00M.txt

### 4) Le lancement du modèle GRP

Les étapes 2, 3 et 4 sont lancées simultanément via le fichier **calcul\_grp.bat** toutes les 5 minutes qui exécutent les scripts **conversion\_observations.R** et **conversion\_previsions.R** puis **calcul\_tot.R**.

Ainsi, lorsque les dernières données observées et prévues sont déposées dans le dossier d'alimentation de GRP (dossier **Entrees**), le modèle est lancé simultanément aux pas de temps 15 minutes et horaire.

Le Tableau 28 fournit le planning de lancement des tâches planifiées pour l'import des données et pour le lancement de GRP. L'étape d'import (étape 1) correspond aux colonnes 1ER IMPORT/2EME IMPORT/3EME IMPORT. Le lancement de **calcul\_grp.bat** est effectué aux heures indiquées dans les colonnes 1ER RUN/2EME RUN/3EME RUN.

Tableau 28 : Heure de lancement des différentes tâches planifiées

HEURE ANTILOPE	DISPO FTP	1ER IMPORT	2EME IMPORT	3EME IMPORT	1ER RUN	2EME RUN	3EME RUN
XX:00	XX:12	XX:13	XX:18	XX:23	XX:14	XX:19	XX:24
XX:15	XX:27	XX:28	XX:33	XX:38	XX:29	XX:34	XX:39
XX:30	XX:42	XX:43	XX:48	XX:53	XX:44	XX:49	XX:54
XX:45	XX:57	XX:58	(XX+1):03	(XX+1):08	XX:59	(XX+1):04	(XX+1):09

Les Figure 25 et Figure 26 résument la stratégie de prévision retenue pour l'implémentation opérationnelle de GRP aux pas de temps 15 minutes et 1h.

Si un problème a été détecté dans les données de débits, de précipitations observées ou prévues lors de l'étape 2 (contrôle des données), le programme produit un fichier fail\_XX.txt où XX correspond au pas de temps du modèle (XX = 15MN ou 1H).

Pour un pas de temps du modèle XX donné (XX = 15MN ou 1H) :

- Si un fichier fail\_XX.txt existe :
  - o L'exécution au pas de temps en question est reportée au run suivant.
  - o Si le modèle arrive au dernier run possible pour le quart d'heure donné (pas de temps 15 minutes : XXh24, XXh39, XXh54, (XX+1)H09) ou l'heure donnée (pas de temps 1 heure : XXh59), une prévision sera tout de même réalisée avec les données disponibles. Dans ce cas, un message d'avertissement sera écrit dans le fichier **Erreur\_GRP.txt** et un mail alertera le prévisionniste d'un défaut dans la mise à jour des bases de données Temps Réel.
- En cas d'alimentation complète de la base de données Temps Réel de GRP lors de la première ou la seconde exécution (pas de temps 15 min) ou dans l'heure en cours, la prévision est réalisée. Une fois cette prévision terminée, un rapide contrôle permet de valider la bonne réalisation. Un fichier success\_XX.txt est alors créé. Si le programme détecte l'existence de ce fichier, il ne réalisera pas de prévision lors des runs suivants pour le pas de temps donné jusqu'à la prochaine mise à jour de la base de données Temps Réel.

Distinction PREMIER\_RUN/SECOND\_RUN/TROISIEME\_RUN

Si PREMIER\_RUN → Suppression de success\_15MN.txt

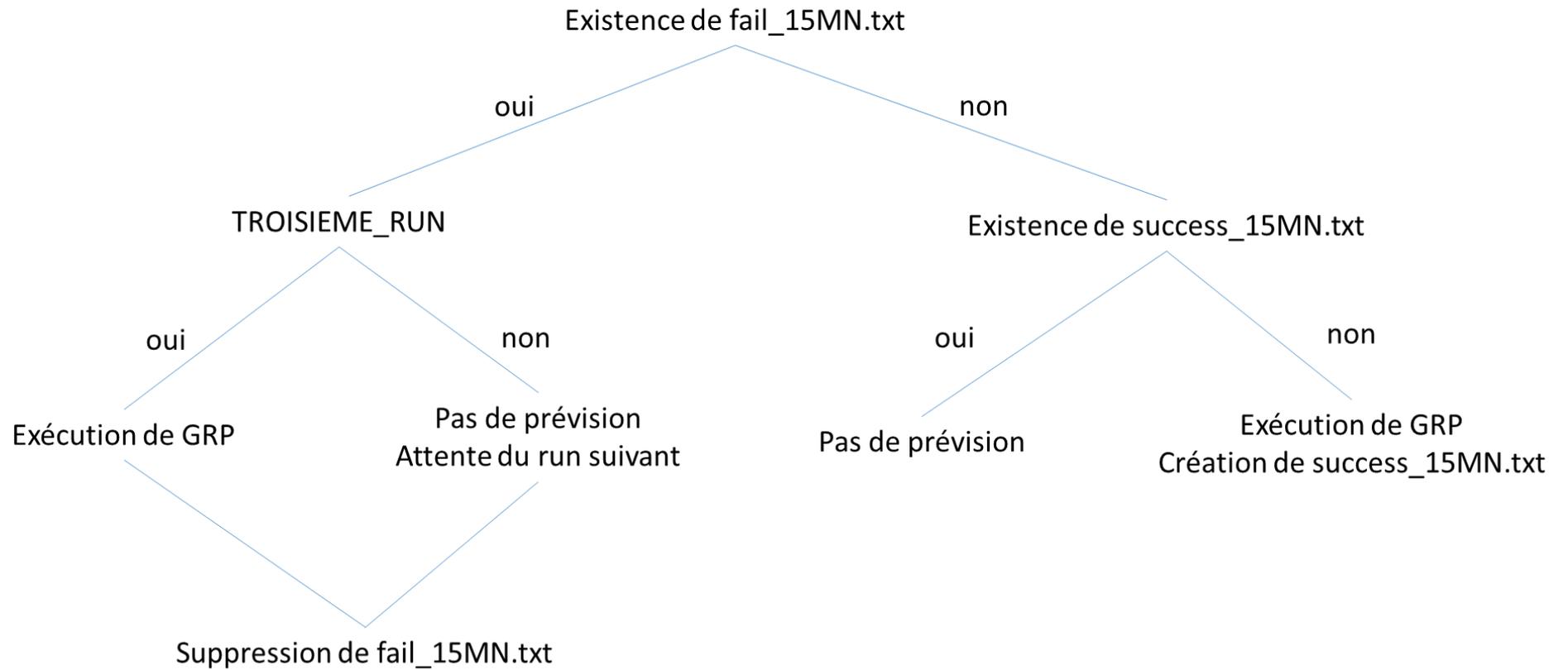


Figure 25 : Stratégie de prévision pour le modèle GRP au pas de temps 15 minutes

1<sup>er</sup> run possible dans l'heure en cours  
Heure comprise entre xxH13 et xxH18 → Suppression de success\_1H.txt

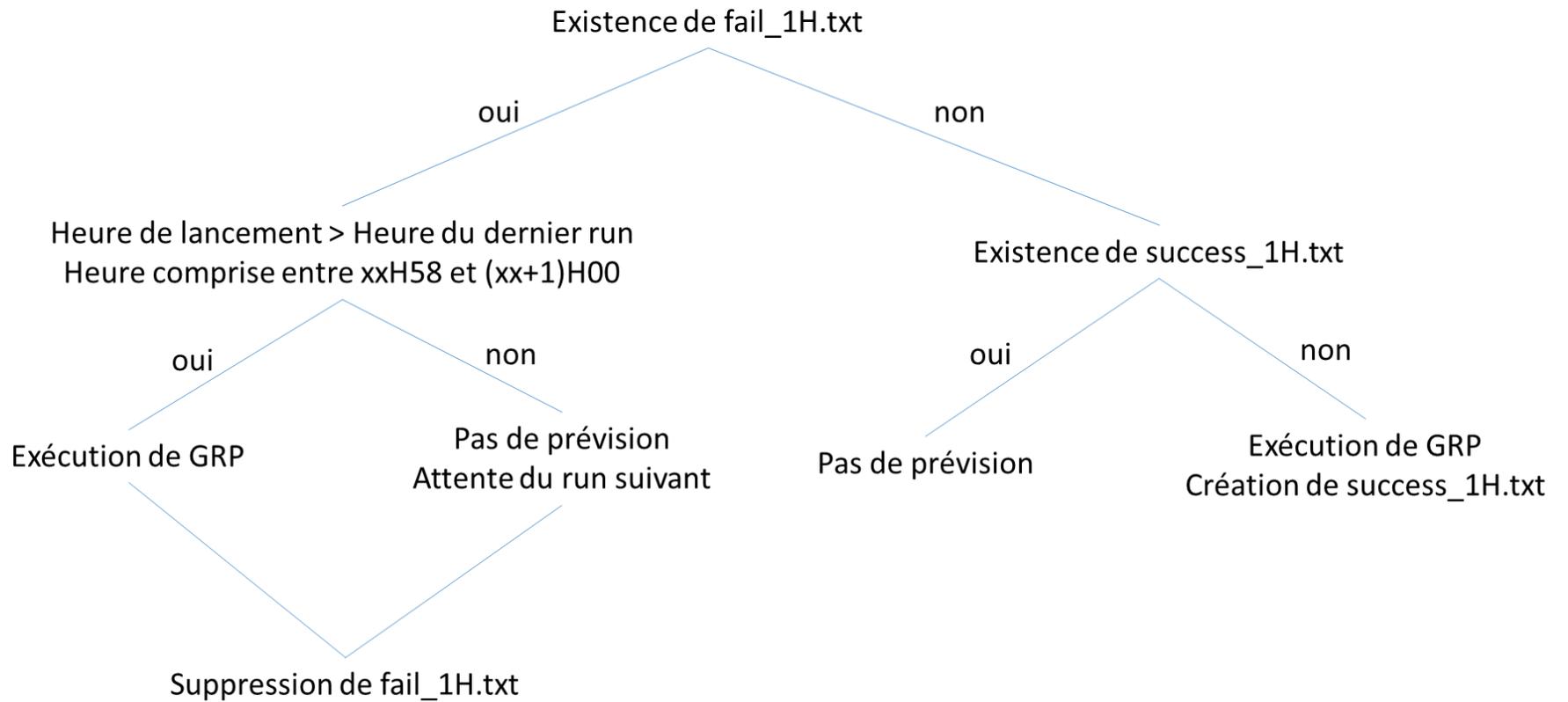


Figure 26 : Stratégie de prévision pour le modèle GRP au pas de temps 1 heure

### 6.3.3. Outils complémentaires

L'alimentation en temps réel des données de précipitations observées est parfois impossible en raison de retard de production de la donnée, d'impossibilité de lecture du fichier déposé sur le serveur AIGA\_FTP, de rupture d'alimentation des outils informatiques, etc Ceci conduit à des lacunes dans la base de données des pluies qui, converties en pluie nulle dans le modèle, peuvent impacter négativement la prévision.

Afin d'identifier rapidement les lacunes et les compléter lorsque cela est possible, un code supplémentaire (**code\_MAJ\_BDD.R** situé dans le dossier **donnees\_temps\_reel**) a été mis en place pour l'analyse de la base de données de pluies. Ce programme permet de recenser toutes les dates pour lesquelles une donnée de pluie observée est manquante sur au moins un des 13 bassins versants étudiés. Une fois la liste des lacunes établie, le programme va interroger le serveur AIGA\_FTP pour récupérer le fichier qui n'a pas été correctement importé lors de l'alimentation en temps réel.

Après contrôle du contenu, les données importées sont mises au format GRP et le script **02-TR\_MAJ\_BDD\_PONCTUEL.exe**, spécialement conçu pour la mise à jour de la base de données temps réel a posteriori, est exécuté. En cas de problème avec le fichier importé (impossibilité de lecture ou lacune dans le fichier), un rapport d'exécution est rédigé dans le fichier **Erreur\_MAJ.txt** spécifiant le type de problème rencontré et la date concernée.

## Conclusion

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 treize 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 sur 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 n'arrive pas à reproduire les événements extrêmes. Parmi les treize bassins, les performances ont été jugées satisfaisantes pour dix bassins, moyennes pour deux bassins et mauvaises pour un bassin.

Une fois la configuration optimale 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).

Cette procédure de calage détaillée dans le rapport a été réalisée au pas de temps horaire. Il convient de réaliser un travail similaire pour le pas de temps 15 minutes. Pour l'instant, le modèle au pas de temps 15 minutes est calé de manière « grossière » en utilisant un seuil de calage nul et une correction de type RNA pour les treize bassins étudiés.

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.

Un retour d'expérience à l'aide de rejeux sera réalisé en fin d'année 2021 afin d'évaluer la pertinence du modèle GRP sur les bassins modélisés. Le passage à la version 2020 permettra également à la CVH de disposer des dernières fonctionnalités du modèle (nouvelles fiches performances facilitant la comparaison de configurations lors du calage, temps d'exécution raccourci par la modification de la gestion de la base de données Temps Réel, utilisation de scénarios pour combler les lacunes éventuelles avant l'instant de prévision...).

## Références

- Berthet, L., 2010. Prédiction 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.
- Paluszkiewicz, M., 2019. Applicabilité de la méthode AIGA sur l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'études, ENGEES, Irstea, Antony, 82 pp.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279 275-289.
- Perrin, F., Sauzey, P., Ménoiret, B., Roche, P.-A., 2017. Rapport inondations mai-juin 2016.
- Pohl, B., Morel, B., Barthe, C., Bousquet, O., 2016. *Monthly Weather Review* 144, 11; [10.1175/MWR-D-15-0404.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0404.1), American Meteorological Society
- Réchou, A., Flores, O., Jumaux, G., et al., 2019. Spatio-temporal variability of rainfall in a high tropical island: Patterns and large-scale drivers in Réunion Island. *Q J R Meteorol Soc*, 2019;145:893–909. <https://doi.org/10.1002/qj.3485>
- Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de prédiction de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, Cemagref Antony, EPHE, Paris, 374 pp.
- Viatgé, J., Pinna, T., Ficchi, A., Perrin, C., Dorchie, D., Garandeau, L., Tilmant, F., 2019. Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prédiction des crues GRP. *La Houille Blanche* (2), pp. 72-80.
- Viatgé, J., Perrin, C., 2019. AMÉLIORATION DES CAPACITÉS DE PRÉVISION DE LA CVH RÉUNION. Évaluation du modèle de prédiction des crues GRP au contexte réunionnais. Rapport d'étude, Irstea, Antony, 47 pp.