



Travail de fin d'étude

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Promotion 62

Voie d'approfondissement :

Année 2016-2017

Environnement > Gestion des cours d'eau et du littoral

Soutenu le 31 août 2017

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Laurent LASSABATERE
- Tuteur : Pierre NICOLLE
- Expert : Patrice DEVILLERS

Par

Audrey BILDSTEIN

Tests exploratoires pour la mise en place de prévisions opérationnelles des crues sur l'île de la Réunion

Organisme d'accueil
IRSTEA



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	BILDSTEIN		
Prénom	Audrey		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	IRSTEA, Antony (92)		
Nom du Tuteur	Pierre NICOLLE		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Tests exploratoires pour la mise en place de prévisions opérationnelles des crues sur l'île de la Réunion		
Titre (anglais)	Exploratory tests for setting up operational flood forecasting methods on Reunion island		
Résumé (français)	<p>Ce travail de fin d'étude a été réalisé au sein de l'équipe Hydro d'IRSTEA à Antony. L'objectif initial était d'avoir à terme un outil de prévisions des crues sur l'île de la Réunion. La présente étude se concentre sur la possibilité de mettre en place un modèle hydrologique de simulation. Il s'agit de voir si le modèle prend correctement en compte les conditions particulières de l'île, à la fois géographiques et climatiques.</p> <p>Le travail de traitement de données a montré des comportements différents de ceux de métropole. Différentes hypothèses peuvent expliquer les causes de divergences entre débits observés et simulés. Le travail réalisé permet de les identifier et d'envisager des pistes d'améliorations.</p>		
Résumé (anglais)	<p>This study for ending graduation took place in the Hydro team of IRSTEA, Antony. The aim of the study was to test on Reunion Island's catchments a tool for flood forecasting. This tool is currently used in continental France. The main point is to highlight if the model is able to take into account the geographic and climatic particularities of the island.</p> <p>The data treatment work has shown different behaviors than those found in continental France. Different assumptions can explain the discrepancies between observed and simulated flows. The present study enables listing the assumptions and planning other ways of improvements.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Modélisation hydrologique, débit, précipitation, cyclone		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Hydrological modelling, flow, precipitation, cyclone		
Termes géographiques	île de la Réunion		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	59	9 (sur 13 pages)	28

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier mon encadrant Pierre NICOLLE et Charles PERRIN l'animateur de l'équipe Hydro d'IRSTEA Antony pour m'avoir acceptée en Travail de Fin d'Etude au sein de l'équipe. Je remercie particulièrement Pierre NICOLLE pour m'avoir encadrée, conseillée et aidée tout au long de mon TFE.

Je souhaite également remercier tous les membres de l'équipe Hydro pour m'avoir accueillie chaleureusement. Merci à Maria-Helena RAMOS pour m'avoir fait confiance lors de ma recherche de stage. Merci à Julie VIATGE de m'avoir consacré du temps pour l'explication de son modèle d'étude. Merci à Olivier DELAIGUE pour son aide précieuse avec le langage informatique R. Merci à Vazken ANDRÉASSIAN pour l'ensemble de ses conseils et aides dans la compréhension de certains points de mon étude.

Je tiens à remercier l'ensemble des autres stagiaires : Alexis, Sofia, Thomas, Daniela et Claire, et doctorants : Manon, Morgane, Cédric et Léonard pour leurs conseils et aides dans l'utilisation du langage R.

Enfin je tiens à remercier les personnes de la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de la DEAL Réunion, Jean-François MINGOT et Isabelle ROCHET, pour la fourniture des données hydrologiques et les conseils et échanges au cours du stage, François BONNARDOT de Météo France pour la fourniture des données climatiques, ainsi que le soutien financier de la convention 2017 IRSTEА – SNRH/SCHAPI, qui a permis l'existence du projet de stage.

Sommaire

Notice analytique	2
Remerciements.....	3
Sommaire	4
Liste des illustrations	6
Introduction.....	7
Contexte	8
1. Données et modèle utilisés.....	12
1.1 Données hydro-climatiques.....	12
1.1.1 Précipitations (P).....	12
1.1.2 Données d'évapotranspiration potentielle (ETP).....	13
1.1.3 Données de débit (Q)	14
1.2 Données cartographiques	16
1.2.1 Modèle Numérique de Terrain : MNT	16
1.2.2 Contours de bassin versant.....	16
1.3 Le modèle hydrologique.....	17
1.3.1 Présentation.....	18
1.3.2 Structure et principes généraux du modèle	18
2. Méthodologie	20
2.1 Mise en place du modèle et procédure d'évaluation	20
2.1.1 Procédure générale.....	20
2.1.2 Méthode de calage et d'évaluation du modèle.....	21
2.2 Spatialisation des précipitations par bassin versant	21
2.2.1 Spatialisation par la méthode de Thiessen	21
2.2.2 Spatialisation par la méthode de la distance inverse.....	23
2.3 Chronique d'ETP horaires.....	24
2.3.1 Etendre les données à d'autres années	24
2.3.2 Spatialiser l'ETP en fonction de l'altitude du bassin versant	24
2.3.3 Décomposer au pas de temps horaire.....	25
2.4 Traitement des débits : Agrégation au pas de temps horaire.....	25
3. Résultats.....	26
3.1 Critique des données de débit.....	26
3.2 Spatialisation des pluies	28
3.3 Etude des bilans en eau	31

3.4	Résultats de la modélisation GR4H.....	33
3.4.1	Les performances du modèle	33
3.4.2	Les paramètres du modèle.....	35
4.	Discussion	38
4.1	L'influence des précipitations	38
4.2	L'influence des débits	40
4.3	L'influence des événements hydrologiques	41
	Conclusion	43
	Bibliographie.....	44
	Annexes.....	46
A.1	Synthèses des stations pluviométriques et de leurs données	47
A.2	Positionnement des stations pluviométriques	49
A.3	Synthèses des stations hydrométriques et de leurs données	50
A.4	Positionnement de chacun des bassins versants avec leur numéro.....	51
A.5	Surface des bassins versant à l'étude.....	52
A.6	Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant.....	53
A.7	Diagnostic de modélisation.....	54
A.8	Fonctionnement du modèle GRP	56
A.9	Tests pour une correction des précipitations.....	58

Liste des illustrations

Figure 1: Carte schématisée de l'île de la Réunion avec ses principales caractéristiques (IEDOM 2008 - Réalisation Légendes Cartographie, ("La Réunion - IEDOM," n.d.))	9
Figure 2: Trajectoires des cyclones ou tempête tropicales, à proximité de l'île de la Réunion	10
Figure 3: Localisation des différentes stations de mesure utilisées sur le territoire de l'île de la Réunion. (Réalisation personnelle)	12
Figure 4: Pluviométrie de deux stations situées à l'Est et à l'Ouest, pour chaque mois de l'année. (Réalisation personnelle)	13
Figure 5: Débits moyens par mois pour deux stations différentes : la Ravine Blanche à Chatoire R0045056 (à gauche) et la rivière des Marsouins au pont Pompidou 40120101 (à droite). (Réalisation personnelle)	14
Figure 6: Carte du MNT de l'île de la Réunion, avec la position des bassins versants ainsi que le réseau hydrographique. (Réalisation personnelle).....	16
Figure 7: Caractéristiques de surfaces et d'altitudes moyennes des 23 bassins versants. (Réalisation personnelle) ..	17
Figure 8 : Schéma du fonctionnement conceptuel de GR4H. (Perrin et al., 2003).....	19
Figure 9: Schématisation de la procédure de Calage-Contrôle. (Réalisation personnelle)	20
Figure 10: Carte donnant un exemple de réseau de polygones de Thiessen dans le cas où tous les pluviomètres fonctionnent. (Réalisation personnelle)	21
Figure 11: Exemple de l'intersection des polygones de Thiessen avec le bassin 40120100, dans le cas où tous les pluviomètres sont actifs. (Réalisation personnelle)	22
Figure 12: Carte du zonage plus ou moins 700 m d'altitude. (Réalisation personnelle)	24
Figure 13: Hydrogramme de la rivière des Pluies, au pont Domenjod (station 40310170), entre 2009 et 2016. (Réalisation personnelle).....	26
Figure 14: Hydrogramme de la rivière du Mât, au Barrage (station 40220100), centré sur des données anormalement élevées de début 2003. (Réalisation personnelle)	27
Figure 15: Hydrogramme de la rivière du Mât, au Barrage (station 40220100), centré sur des données douteuses. (Réalisation personnelle).....	27
Figure 16: Cartographie de la pluviométrie annuelle (en mm) sur l'île de la Réunion pour les années 1990 (à gauche) et 1993 (à droite), calculée avec la méthode de l'inverse distance à partir des pluviomètres actifs (croix rouges). (Réalisation personnelle)	28
Figure 17: Comparaison des pluies moyennes de bassins selon leur méthode de spatialisation. (Réalisation personnelle)	29
Figure 18: Carte de la variation des pluies cumulées calculées selon les différentes méthodes. (Réalisation personnelle)	30
Figure 19: Bilans en eau sur 20 bassins versants réunionnais, réalisés avec les pluies calculées par l'inverse distance. (Réalisation personnelle).....	31
Figure 20: Répartition géographique des différents types de bilan des bassins. (Réalisation personnelle)	32
Figure 21: Boxplots de la distribution des valeurs de KGE sur l'ensemble des modélisations, pour la phase de calage et celle de contrôle. (Réalisation personnelle).....	33
Figure 22 : Critères d'évaluation KGE, en phase de calage (à gauche) et de contrôle (à droite), répartis géographiquement. (Réalisation personnelle).....	34
Figure 23: Graphique représentant les rapports des échanges cumulés sur les précipitations cumulées en fonction de la méthode de spatialisation des pluies. (Réalisation personnelle)	36
Figure 24: Hydrogrammes observé et simulé de la rivière Langevin, à la Passerelle (station R0046050), sur la période P1, modélisation avec le jeu de paramètres de la période P2. (Réalisation personnelle).....	38
Figure 25: Graphique des cumuls de débits simulés en fonction des cumuls de débits observés, pour la rivière Langevin, à la Passerelle (station R0046050). (Réalisation personnelle)	39
Figure 26: Hydrogramme de la Ravine Blanche (station R0042033), sur l'année 2000. (Réalisation personnelle)	40
Figure 27: Hyétogramme et hydrogramme observé et simulé de la rivière des Marsouins au Pont Pompidou (bassin 40120101), lors du calage, entre janvier et juin 2012. (Réalisation personnelle)	41
Figure 28: Hyétogramme et hydrogramme observé et simulé de la rivière des Marsouins au Pont Pompidou (bassin 40120101), lors du contrôle, entre janvier et juin 2012. (Réalisation personnelle)	41
Tableau 1: Records mondiaux de pluviométrie détenu par l'île de la Réunion (METEO FRANCE, n.d.)	10
Tableau 2: Synthèse de l'état des données initiales	15
Tableau 3 : Coefficients de conversion de l'ETP journalier en ETP horaire	25

Introduction

La pression du développement territorial induit un besoin grandissant de prévision des événements météorologiques. En effet, les territoires sont soumis à de forts enjeux économiques et humains, que l'on doit protéger des aléas climatiques. Les événements de crues peuvent créer d'importants dégâts sur le plan matériel. Par exemple au Pérou, les importantes inondations de mars 2017 ont eu pour conséquence la destruction de 3 000 km de route et de 260 ponts, entraînant de fortes perturbations dans les réseaux de transports ; des villages entiers ont été détruits ; le coût des dégâts est estimé à 3.1 milliards de dollars américains (Collins, 2017). En France, les crues de la Seine et de la Loire de mai/juin 2016 ont eu des dégâts estimés à plus de 1 milliard d'euros (Perrin et al., 2017).

En France métropolitaine, la prévision des crues est assurée par les Services de Prévision des Crues (SPC) de l'Etat. Elle est réalisée à partir de deux types d'informations : les prévisions météorologiques de Météo France et les données des niveaux des cours d'eau mesurées en temps réel sur le territoire. Des modèles sont alors utilisés afin d'anticiper le comportement des cours d'eau. Ces modèles sont des outils d'appui à la mise en vigilance des territoires. Différents types de modèles existent et sont adaptés aux spécificités des territoires.

Les territoires d'outre-mer sont quant à eux surveillés par des Cellules de Vielle Hydrologique (CVH). Ces territoires sont soumis à des contextes climatiques différents de ceux de France métropolitaine, ce qui rend la transposition des modèles utilisés en métropole plus difficile. Des phénomènes météorologiques sont particuliers à ces territoires et n'existent pas en France métropolitaine : cyclones, tempêtes tropicales...

L'île de la Réunion a la particularité d'être confrontée à l'aléa cyclonique. Les cyclones sont des formations météorologiques entraînant des pluies denses accompagnées de vents violents. L'intensité des précipitations amène une réponse assez rapide des bassins versants, les niveaux des cours d'eau augmentent très vite entraînant des crues. A ce jour, la CVH de la Réunion dispose d'un système de suivi des niveaux d'eau et de mise en vigilance à partir de dépassement de seuils, mais n'a pas encore de modèle de prévision des crues. Notre étude a pour objectif général de tester si un modèle hydrologique de prévision des crues, qui aujourd'hui fonctionne de façon opérationnelle en métropole, peut être transposé à l'île de la Réunion. Ce qui est présenté dans ce rapport correspond à une première étape du projet : tester le modèle hydrologique GR4H en simulation sur les bassins versants d'études, pour évaluer sa capacité à simuler la relation entre pluie et débit sur ces bassins. Nous verrons donc si les données des bassins réunionnais permettent de reproduire les débits via une modélisation hydrologique, avec la question générale suivante :

En quoi le contexte particulier de l'île de la Réunion rend-il difficile la mise en place d'un modèle hydrologique (pour des objectifs opérationnels tels que la prévision des crues)?

Une première partie de ce mémoire présentera le modèle hydrologique et les données nécessaires à son fonctionnement. Une deuxième partie détaillera la démarche méthodologique du traitement des données et de l'évaluation du modèle. La troisième partie rassemblera l'ensemble des résultats obtenus au cours de l'étude, autant sur l'observation des données en elles-mêmes que les résultats de modélisation. Et nous donnerons enfin les principales conclusions et perspectives de ce travail.

Contexte

- Rôles des différents acteurs

La prévision des crues est assurée par 22 Services de Prévision des Crues (SPC) en France métropolitaine et par des Cellules de Veille Hydrologique (CVH) pour les territoires d'outre-mer. La CVH de l'île de la Réunion a été créée en 2010 par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la Réunion (DEAL). La CVH est désormais en charge de la vigilance des crues de 17 bassins versants sur son territoire. La CVH récupère les données de débits de chacun des bassins et annonce les événements de crues à venir sur le site dédié (<http://vigicrues-reunion.re/>). Ne possédant aujourd'hui pas encore de modèle fonctionnel de prévision des crues, la CVH ne peut fournir de prévision des débits ou niveaux d'eau attendus pour une échéance donnée. Le travail de vigilance se base sur un système d'abaques donnant la correspondance entre un niveau d'eau, une quantité de pluie prévue et les débits attendus. Ces abaques sont réalisés à partir de valeurs historiques. La vigilance permet de définir l'existence d'un risque de crue en cas de dépassement de seuils prédéfinis.

Le travail de la CVH est réalisé conjointement à celui de Météo France pour la Réunion. Cette dernière entité a entre autres pour mission la collecte et l'analyse des données climatiques (pluie, évapotranspiration potentielle (ETP), etc.), ainsi que la prévision météorologique et la surveillance cyclonique.

IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) français, réparti sur neuf centres en France métropolitaine. L'équipe Hydrologie des bassins versants (Hydro) de l'Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN) d'IRSTEA Antony axe ses travaux de recherche sur le développement de modèles fiables de représentation du fonctionnement hydrologique des bassins versants, la production d'outils de prévision des aléas hydrologiques et la prise en compte des changements globaux en hydrologie. Différents outils de modélisation hydrologique d'appui à la prévision des crues y sont notamment développés. Le projet de stage a été monté avec l'objectif d'évaluer les performances du modèle de prévision des crues GRP dans un contexte autre que celui pour lequel il a été développé. Le stage se déroule dans le cadre de la convention SCHAPI-IRSTEA. Le SCHAPI est le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, situé à Toulouse, qui coordonne les travaux des différents SPC et CVH.

- Contexte géographique et hydro-climatique de l'île de la Réunion

L'île de la Réunion est née de l'éruption de deux volcans : le Piton des Neiges occupant les deux-tiers Nord-Ouest de l'île et le Piton de La Fournaise occupant le tiers Sud-Est restant. Sa géologie est donc constituée de roches volcaniques (Nehlig and Bucelle, 2005). L'île a une superficie de 2 500 km² et une forme elliptique allongée selon sa diagonale Nord-Ouest/Sud-Est d'une longueur maximale de 70 km. Le relief de l'île est très marqué, trois sommets culminent à plus de 2 500 m d'altitudes : le Piton des Neiges (3 070 m), Piton de la Fournaise (2 632 m), le grand Bénare (2 898 m) (**Figure 1**). Le relief de l'île est principalement réparti sur sa diagonale NO-SE. Ceci scinde le territoire en deux et crée une variabilité spatiale des précipitations. Les pluies arrivent majoritairement par l'Est. Ainsi la demi-partie Est de l'île est beaucoup plus arrosée que l'Ouest.



Figure 1 : Carte schématisée de l'île de la Réunion avec ses principales caractéristiques (IEDOM 2008 - Réalisation Légendes Cartographie, ("La Réunion - IEDOM," n.d.))

Le réseau hydrographique de l'île est très dense (**Figure 3**). Il comprend à la fois des rivières et des petits plans d'eau intérieurs qui sont en permanence en eau, mais aussi de nombreuses ravines sèches qui sont en eau seulement en période de pluies (Comité de Bassin Réunion, 2013). De manière générale, l'eau s'écoule sur les planèzes (plateaux basaltiques faiblement inclinés, limités par des vallées convergentes) avant d'atteindre le piémont (plaine au pied de montagne) ou la plaine du littoral. Les bassins versants de la Réunion ont la particularité d'être de petite taille et assez pentus, ce qui rend les transferts d'eau rapides. Le temps de concentration, c'est-à-dire la durée que met une molécule d'eau à traverser le bassin versant est de l'ordre de l'heure (BRL Ingénierie, 2016).

Le cumul des pluies est soumis à une forte variabilité spatio-temporelle. En effet, pour une même période, il pleut en général plus à l'Est qu'à l'Ouest. Et pour une même zone géographique, il pleut beaucoup plus en saison humide (décembre à avril) qu'en saison sèche (mai à novembre).

- Aléa cyclonique et modélisation

La localisation de l'île au Sud-ouest de l'Océan Indien, la rend extrêmement vulnérable aux cyclones. La période cyclonique correspond à la période chaude et humide, avec un risque

maximum durant les trois mois de l'été austral (janvier, février et mars) (METEO FRANCE, 2016). C'est sur cette période que toutes les conditions sont réunies pour la genèse des tempêtes ou cyclones tropicaux au milieu de l'Océan Indien.

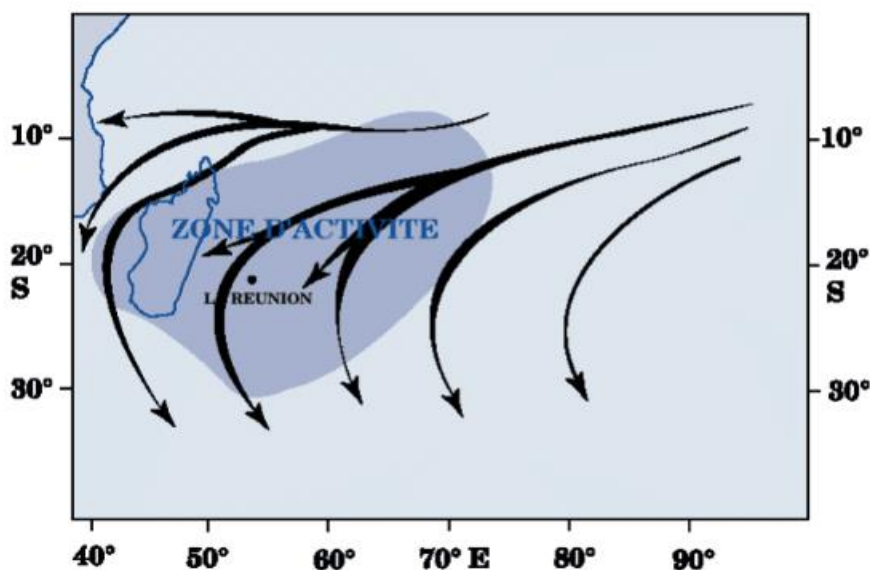


Figure 2 : Trajectoires des cyclones ou tempête tropicales, à proximité de l'île de la Réunion

Dans l'hémisphère Sud, les systèmes cycloniques se déplacent d'Est en Ouest avec une déviation possible vers le Sud. L'île de la Réunion se situe au cœur de la zone d'activité de ces tempêtes et cyclones (**Figure 2**).

Les cyclones sont organisés en bandes de nuages denses centrées autour de l'œil cyclonique. Les cyclones peuvent atteindre quelques centaines de kilomètres de diamètre. Les événements cycloniques arrivent par l'Est et apportent des vents violents et des fortes pluies sur plusieurs heures. La durée et l'intensité des pluies sont des paramètres clés pour la réponse hydrologique des bassins versants.

L'île de la Réunion possède des records mondiaux de précipitation pour des durées allant de 12 heures jusqu'à 15 jours (METEO FRANCE, n.d.).

Tableau 1 : Records mondiaux de pluviométrie détenus par l'île de la Réunion (METEO FRANCE, n.d.)

Durée	Cumul mesuré (mm)	Nom du pluviomètre	Nom du cyclone	Date du début de l'épisode
12 heures	1 144	Foc-Foc	Cyclone DENISE	07/01/1996
24 heures	1 825	Foc-Foc	Cyclone DENISE	07/01/1996
3 jours	3 930	Commerson	Cyclone GAMEDE	26/02/2007
4 jours	4 936	Commerson	Cyclone GAMEDE	24/02/2007
10 jours	5 678	Commerson	Cyclone HYACINTHE	18/01/1980
15 jours	6 083	Commerson	Cyclone HYACINTHE	14/01/1980

En comparaison, en France métropolitaine, les valeurs de précipitations les plus fortes en 24 heures sont localisées au Sud de la France (Le Gard, l'Ardèche, l'Hérault ou la Lozère), à l'occasion des pluies cévenoles. Les cumuls de pluies extrêmes peuvent alors dépasser les 600 mm en 24 heures.

La pluie moyenne annuelle à Paris est de l'ordre de 650 mm. Avec le passage du cyclone GAMEDE, il a plu à Commerson en 3 jours l'équivalent de ce qu'il pleut à Paris en 6 ans (**Tableau 1**).

Les pluies diluviennes causées par des cyclones ou autres épisodes pluvio-orageux entraînent des inondations et glissements de terrain, engendrant eux-mêmes des pertes économiques et de vies humaines. Le cyclone HYACINTHE, en 1980, a par exemple un bilan humain de 25 morts. Le cyclone DENISE, en 1996, a conduit à la mort de 3 personnes et d'importants dégâts des infrastructures routières et agricoles. Le cyclone GAMEDE de 2007 a fait 2 victimes, détruit un pont ainsi que des routes et endommagé des habitations.

Afin d'améliorer la gestion de ces événements extrêmes, des projets de recherche naissent. Le projet SPICY (**S**ystème de **P**révision des **I**ndonations côtières et fluviales en contexte **C**yclonique) financé par l'Agence Nationale de la Recherche, en est un exemple (BRGM, 2014). L'objectif du projet est de fournir, grâce à une approche multidisciplinaire, des outils opérationnels de prévision à chaque niveau : de la modélisation météorologique à la modélisation des inondations, en passant par la gestion de crise.

Dans le cadre de ce projet, BRL Ingénierie a réalisé l'étude de modélisation hydrologique pour la prévision des crues (BRL ingénierie, 2016), leur objectif étant de mettre en place un modèle de prévision des crues adapté aux cyclones. Leur étude s'est concentrée exclusivement sur la simulation de 12 événements les plus forts entre 2000 et 2015. Des pas de temps horaires et 6 minutes ont été utilisés sur les périodes de ces événements. La spatialisation des pluies a été réalisée par krigeage (méthode de spatialisation qui prend en compte la variance des données elles-mêmes), ce qui a permis de mieux prendre en compte le relief. De plus, les modèles utilisés sont dits « distribués », c'est-à-dire qu'ils prennent en compte le bassin versant comme une multitude d'unités hydrologiques et non pas comme un ensemble global. Les conclusions de cette étude ont montré de meilleurs résultats de modélisation pour des pas de temps horaires et à 6 minutes qu'au pas de temps journalier.

Dans la cadre de notre étude, nous ne nous intéressons pas à une modélisation événementielle mais à une modélisation continue qui puisse être utilisée de manière opérationnelle par la CVH. De plus, nous resterons au pas de temps horaire.

1. Données et modèle utilisés

Cette partie permet de présenter les données utilisées dans l'étude, ainsi que le modèle choisi.

Les données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle nous ont été fournies par Météo France. Les bases de données des débits nous ont été fournies par la Cellule de Veille Hydrologique. L'ensemble des données nous permet de travailler sur 23 bassins versants de l'île.

1.1 Données hydro-climatiques

Les données hydro-climatiques ont été recueillies à partir de différentes stations réparties sur le territoire comme illustré sur la **Figure 3**.

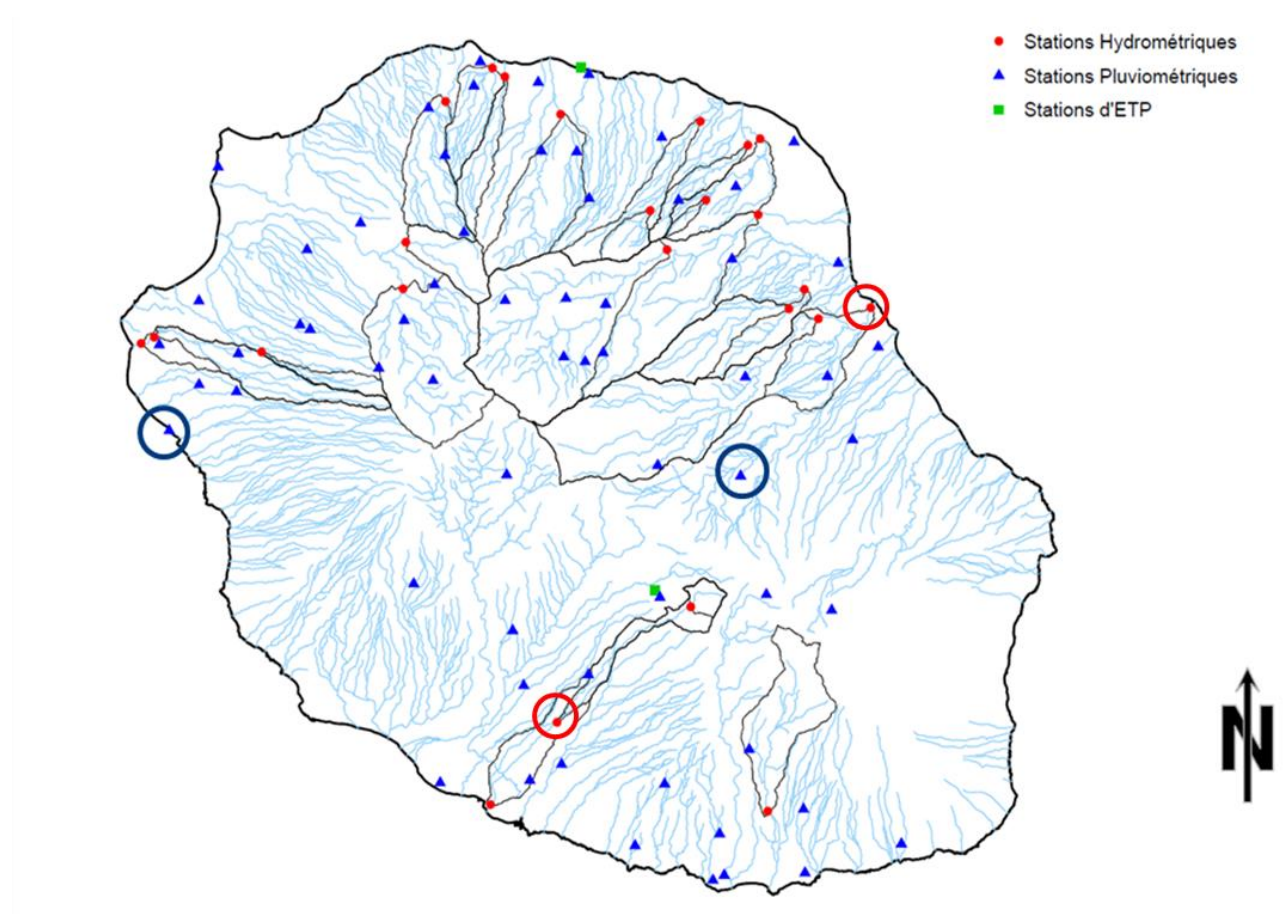


Figure 3 : Localisation des différentes stations de mesure utilisées sur le territoire de l'île de la Réunion. (Réalisation personnelle)

Les deux stations pluviométriques entourées en bleu (97415590 à l'Ouest et 97406220 à l'Est) correspondent à celles prises pour exemple dans le paragraphe suivant (1.1.1). Les deux stations hydrométriques entourées en rouge (40120101 à l'Ouest et R0045056 à l'Est) correspondent à celles prises pour exemple dans le paragraphe 1.1.3.

1.1.1 Précipitations (P)

L'information relative à la quantité de pluie provient des 64 pluviomètres installés sur l'île. Ces pluviomètres fonctionnent au pas de temps variable et les données ont été agrégées au pas de

temps 6 minutes et horaire. Leur répartition n'est pas homogène sur le territoire, mais ils sont assez bien présents au niveau des bassins versants de notre étude. Il est important de noter que les pluviomètres n'ont pas tous les mêmes périodes de fonctionnement : les données pluviométriques recueillies couvrent une période de 1989 à fin 2016. Cependant les pluviomètres ne commencent à être nombreux (13 sur les 64) qu'à partir de 1993. Par ailleurs, des périodes de lacunes (absence de données) sont fréquentes sur la durée de leur fonctionnement, (A.1 Synthèses des stations pluviométriques et de leurs données), elles peuvent alors être caractérisées à partir du taux de lacunes. Celui-ci varie entre 0% et 62% selon les stations et est en moyenne de 2.5% sur les 64 stations pluviométriques.

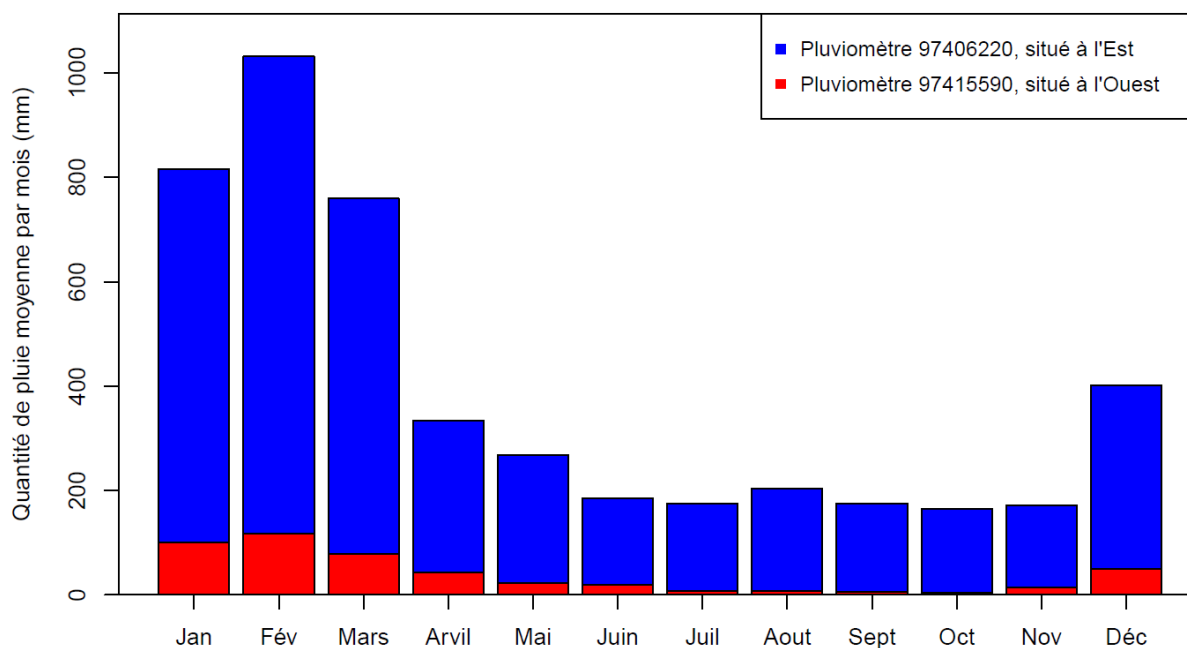


Figure 4 : Pluviométrie mensuelle moyenne de deux stations situées à l'Est et à l'Ouest, pour chaque mois de l'année, entre 1991 et fin 2016. (Réalisation personnelle)

L'exemple de la **Figure 4** montre bien la différence spatio-temporelle de la pluviométrie de l'île :

- A l'Est, il pleut en moyenne plus de 1 000 millimètres par mois au plus fort de la saison des pluies, contre une centaine de millimètres pour un pluviomètre à l'Ouest.
- Les précipitations vont du simple au quintuple entre la saison sèche et humide.

1.1.2 Données d'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la quantité d'eau maximum (en millimètres) qui pourrait être transférée à l'atmosphère par évaporation simple et par transpiration de la végétation. Cette variable est influencée par divers paramètres, tels que le type et la densité de végétation, la température et l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, le vent... L'ETP varie donc en fonction des saisons et de la position géographique.

Deux stations mesurant l'ETP sont présentes sur l'île (**Figure 3**) : une sur le littoral au niveau de l'aéroport Roland Garros (code : 97418110) et l'autre en altitude à 1560 m dans la plaine des Cafres (code : 97422440). Les mesures sont au pas de temps journalier. Les données commencent en 1998 et finissent mi-2015 pour la station 97418110, tandis que la station 97422440 a des données à partir de 2000 jusque mi-2015.

Les valeurs d'ETP journalière au niveau du littoral (station 97422440) varient entre 0.1 à 9 mm/j avec une moyenne de 5.3 mm/j. Les valeurs d'ETP journalière en altitude (station 97422440) sont plus faibles : entre 0 à 7.9 mm/j avec une moyenne de 2.3 mm/j.

1.1.3 Données de débit (Q)

Nous avons étudié 23 stations hydrométriques, correspondant aux 23 bassins versants d'étude (**Figure 3**). Parmi les stations, 12 sont gérées exclusivement par la CVH et 6 par l'Office de l'Eau (OE), et 5 sont en gestion partagée entre les deux organismes. L'OE s'intéresse plus particulièrement aux situations de bas débits pour des objectifs de gestion de la ressource en eau, tandis que la CVH se concentre plus sur les hauts débits dans un objectif de vigilance face aux crues.

Pour les cinq stations en gestion partagée, il existe des mesures réalisées à la fois par la CVH et l'OE. Cela peut venir du fait que la gestion était d'abord faite par l'OE, puis reprise par la CVH ou alors que la station présente un intérêt à la fois pour les basses et hautes eaux et est donc suivie par les deux organismes. Dans l'étude, en cas de doublon de données nous avons choisi de conserver en priorité celles de la CVH, car leurs données en hautes eaux sont considérées plus fiables que celles de l'OE.

Les données de débit correspondent à la transformation des hauteurs d'eau mesurées en station. La transformation se fait à partir d'une courbe de tarage (relation hauteur d'eau-débit) calée sur des points de jaugeage correspondant à des mesures simultanées de hauteur et débit. Les données ont été fournies au pas de temps variable et leur unité est le mètre cube par seconde.

Les dates de début et fin de fonctionnement varient en fonction des stations hydrométriques (A.3 Synthèses des stations hydrométriques et de leurs données). La plus ancienne débute en juillet 1981 (station R0042033, Ravine Blanche - Plaine des Cafres) et la plus récente commence en novembre 2011 (station 40130131 rivière des Roches, à Bassin La Paix). La majorité des stations (15/23) est aujourd'hui toujours en activité.

Sur les périodes de fonctionnement des stations, des lacunes sont observables. Le taux de lacune varie entre 0 à 68% selon les stations et est en moyenne de 14%. Les débits moyens varient entre 66 l/s pour la station R0045056 et 13 570 l/s pour la station 40120101.

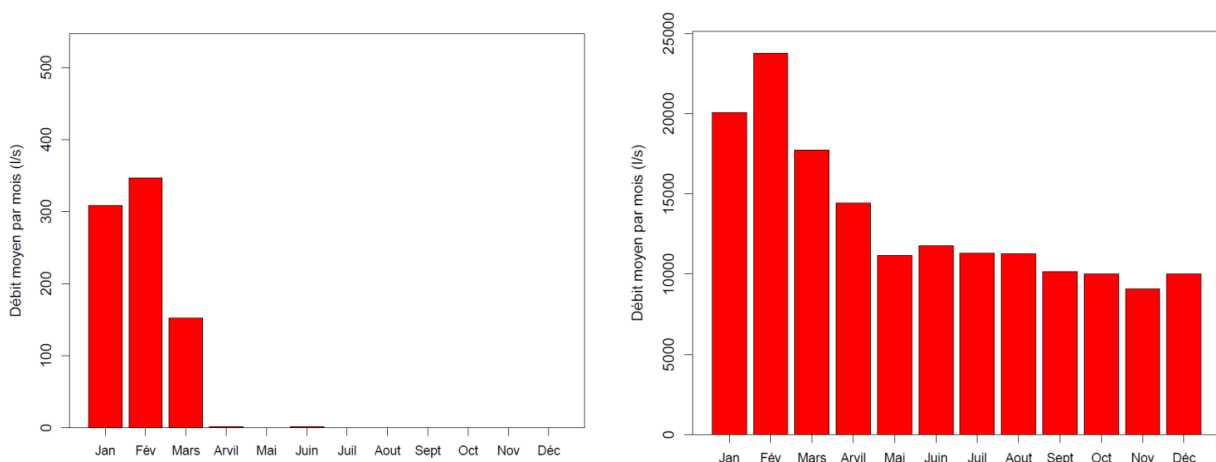


Figure 5: Débits moyens par mois pour deux stations différentes : la Ravine Blanche à Chatoire R0045056 (à gauche) et la rivière des Marsouins au pont Pompidou 40120101 (à droite). (Réalisation personnelle)

Sur l'ensemble des bassins versants, on a des comportements hydrologiques très divers. Par exemple, sur la **Figure 5**, on observe une grande disparité pour les débits mensuels moyens entre les différents bassins. Le bassin R0045056 de la Ravine Blanche est en eau pendant seulement trois mois et avec un débit mensuel moyen n'excédant pas 400 l/s, c'est un cours d'eau dit intermittent, tandis que le bassin 40120101 de la rivière des Marsouins au pont Pompidou est en eau durant toute l'année avec un débit mensuel minimum de 9000 l/s en novembre et maximum de 24000 l/s en février.

Il est important de noter que la base de données hydrométriques qui nous a été fournie est très riche comparativement à ce qui peut exister sur d'autres territoires d'outre-mer.

Le **Tableau 2** permet de synthétiser les données de notre étude. On y retrouve les différents pas de temps et le nombre de stations par type de variables, ainsi que les extrêmes de dates de début et de fin de chroniques.

Tableau 2 : Synthèse de l'état des données initiales

	Pas de temps	Nombre de stations	-	Minimum	Maximum	Moyenne
Données de précipitation (en mm)	Horaire	64	Période de début	01/01/1989	23/05/2013	-
			Période de fin	30/03/1999	31/12/2016	-
			Nombre de données	96	248362	105000
			Taux de lacune	0%	62%	2.5%
ETP (en mm)	Journalier	2	Période de début	01/01/1998	01/01/2000	-
			Période de fin	02/07/2015	02/07/2015	-
			Nombre de données	11151	11968	-
Données de débit (en m ³ /s)	Variable	23	Période de début	07/01/1981	01/11/2011	-
			Période de fin	01/03/2007	31/12/2016	-
			Nombre de données	209479	3574753	790000
			Taux de lacune	0%	68%	14%

Ce tableau permet d'illustrer la diversité des données. On peut voir pour les stations de pluviométrie par exemple, qu'une des stations ne fournit que 96 valeurs alors qu'une autre en fournit plus de 248 000. De même pour le taux de lacune, certaines stations n'en ont pas alors qu'une d'entre elles en a 62%. Les données initiales fournies par les différentes stations sont donc très hétérogènes d'un point de vue quantitatif.

1.2 Données cartographiques

Les données de cartographie générale (contour de l'île, réseau hydrographique) ont été récupérées sur le portail du SANDRE (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels de l'Eau) (SANDRE, n.d.). Les données relatives aux contours des bassins versants et des positionnements de stations hydro-climatiques, nous ont été remises par la CVH.

1.2.1 Modèle Numérique de Terrain : MNT

Le modèle numérique de terrain permet de cartographier le relief du territoire (**Figure 6**).

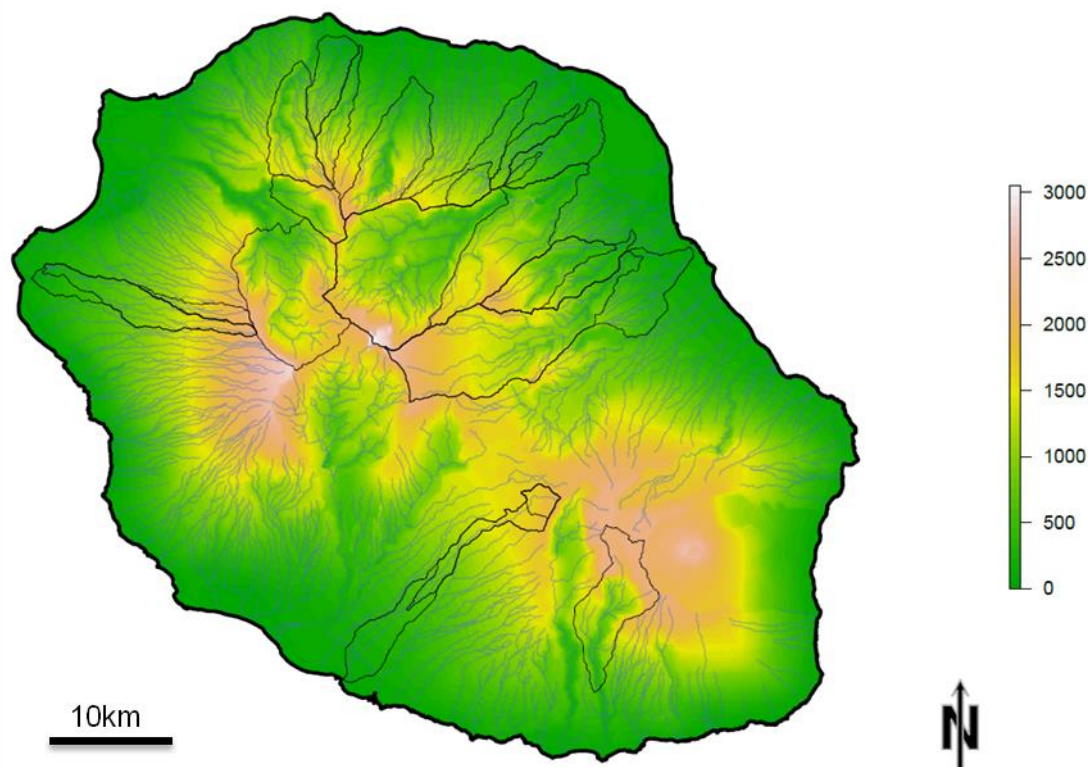


Figure 6: Carte du MNT de l'île de la Réunion, avec la position des bassins versants ainsi que le réseau hydrographique. (Réalisation personnelle)

Le MNT permet de connaître en chaque point du territoire l'altitude qui lui est associée.

1.2.2 Contours de bassin versant

Les contours de bassins versants ont été tracés par la CVH à partir du relief, du réseau hydrographique et de la position de l'exutoire des bassins. La CVH a sélectionné les bassins sur lesquels les données hydro-climatiques sont jugées de qualité correcte. Vingt-trois bassins ont été retenus pour notre étude (cf. A.4 Positionnement de chacun des bassins versants). Certains bassins sont emboîtés les uns dans les autres.

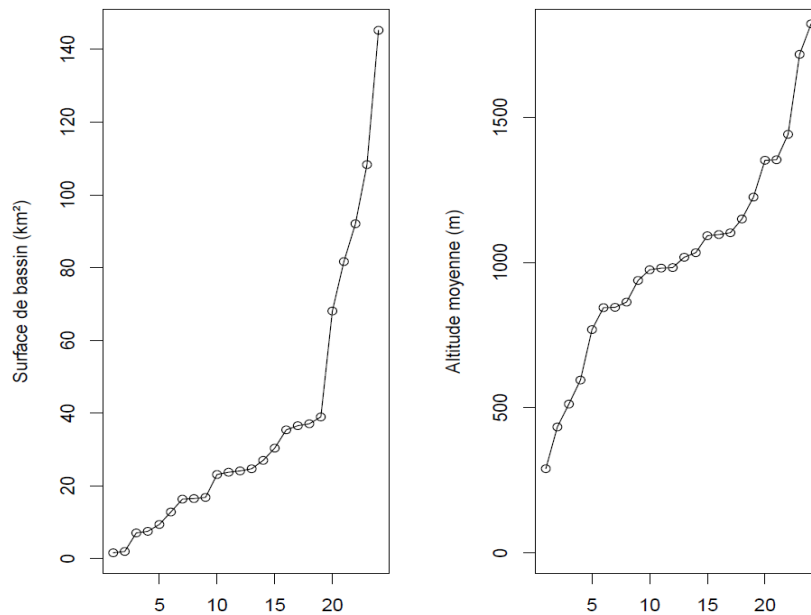


Figure 7 : Distribution des surfaces (km²) et d'altitudes moyennes (m) des 23 bassins versants. (Réalisation personnelle)

La **Figure 7** permet de caractériser les différents bassins versants à partir de leur surface et de leur altitude moyenne. Les surfaces des bassins varient entre 1.9 km² et 145 km², avec une médiane à 25 km². Il est intéressant de noter que l'altitude moyenne des bassins versants est assez hétérogène : de 290 m jusqu'à plus de 1800 m, ceci est en lien avec la forte variabilité du relief sur l'île.

1.3 Le modèle hydrologique

Divers modèles hydrologiques existent, ils ont pour objectif de représenter les processus du cycle de l'eau. Dans notre travail, nous nous concentrons sur le transfert des pluies en débits, c'est pourquoi nous utilisons des modèles appelés « Pluie-Débit ».

Le modèle hydrologique peut fonctionner de deux manières : soit en simulation, soit en prévision. C'est dans les deux cas un modèle qui fournit des débits à partir de pluies.

- La simulation fait tourner le modèle en continu sur la période, les états du modèle varient en fonction des données d'entrée, mais il n'y a pas d'assimilation de données ou de mise à jour qui les modifie.
- La prévision se place à un instant donné et « regarde » dans le futur pour prévoir le débit à une échéance définie appelée horizon de prévision. De plus, à chaque pas de temps, les états du modèle peuvent être modifiés (via l'assimilation des données de débits par exemple) afin de réduire l'erreur entre débit simulé et observé.

La simulation et la prévision sont deux exercices ayant des objectifs différents. Dans le premier cas, l'objectif est de reproduire le comportement hydrologique du cours d'eau. Dans le second, l'objectif est de pouvoir anticiper au mieux un événement à venir à quelques heures ou jours d'échéance.

1.3.1 Présentation

Le modèle hydrologique GR4H (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaire, (Le Moine, 2008; Mathevet, 2005)) développé par IRSTEA est celui que nous avons utilisé pour l'étude. Ce modèle a été choisi de par son fonctionnement au pas de temps horaire. Comme cela a été présenté dans la partie 'Contexte', les modélisations hydrologiques au pas de temps horaire donnent de meilleurs résultats sur l'île de la Réunion (BRL Ingénierie, 2016).

Le modèle est utilisé dans un premier temps en simulation, l'objectif est de tester le modèle pour voir s'il est capable de bien reproduire les débits des bassins réunionnais. Travailler sans assimilation de données permet d'étudier uniquement la relation hydrologique entre les variables, sans que celles-ci ne soient corrigées.

GR4H est un modèle global, c'est-à-dire qu'il considère le bassin comme une entité homogène : il travaille donc avec des variables moyennées à l'échelle du bassin versant (il n'y a pas de découpage en sous-bassins ou en pixels). Le modèle est simple afin de pouvoir en avoir une utilisation opérationnelle en temps réel ; robuste car il fonctionne même lorsque des données de débits sont manquantes ; et adaptable selon les scénarios de prévision météorologique.

Le modèle GR4H est un modèle conceptuel à 4 paramètres libres, dont le calage permet de reproduire le fonctionnement du bassin. GR4H fonctionne de manière continue au pas de temps horaire. Les chroniques des variables en entrée (précipitations et ETP) doivent être continues et sans lacunes. Les débits de sortie sont générés toutes les heures. Le choix d'un modèle au pas de temps horaire est important pour ensuite faire de la prévision opérationnelle.

GR4H est disponible de façon libre dans le package airGR (Coron et al., 2017b, 2017a) pour le langage informatique R.

1.3.2 Structure et principes généraux du modèle

Le modèle GR4H appartient à la famille des modèles « Pluie-Débit », il utilise des données d'entrée de précipitation pour les traduire en débit à l'exutoire du bassin versant. Le modèle représente le bassin versant de manière conceptuelle avec une succession de réservoirs (**Figure 8**).

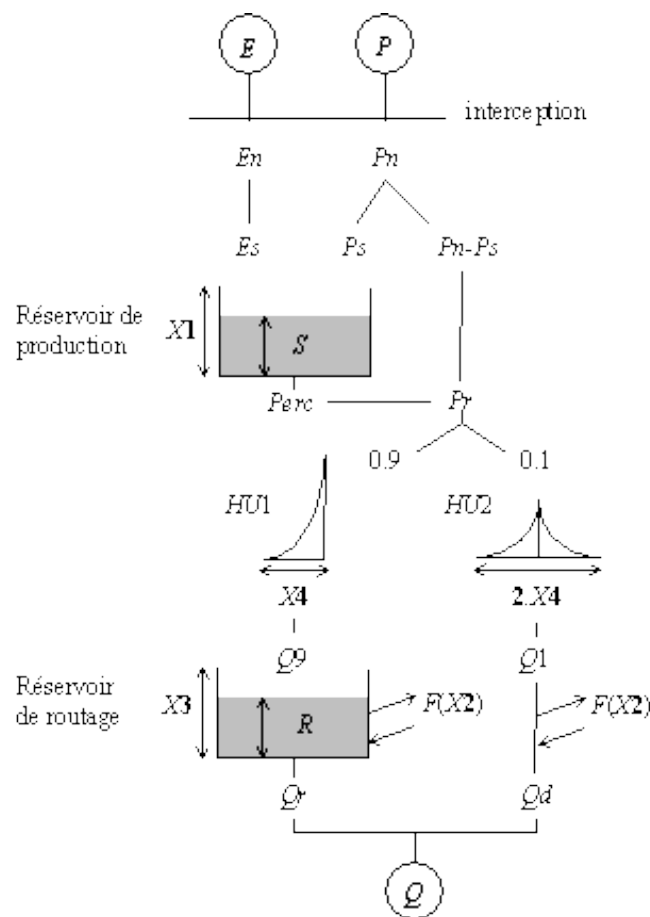


Figure 8 : Schéma du fonctionnement conceptuel de GR4H. (Perrin et al., 2003)

La précipitation est d'abord neutralisée par l'évapotranspiration potentielle. L'eau résiduelle est partagée en deux, entre le réservoir de production de capacité $X1$ et le routage. La partie routée est transmise au réservoir de routage de capacité $X3$ via l'hydrogramme unitaire de temps de base $X4$. Des échanges avec les bassins voisins ou les nappes sont contrôlés par une fonction dépendant du coefficient d'échange $X2$. La sortie des deux branches d'écoulement forment le débit en sortie de modèle (Perrin et al., 2007).

Les quatre paramètres à caler sont donc :

- $X1$: la capacité du réservoir de production (en mm)
- $X2$: le coefficient d'échanges souterrains (en mm/h)
- $X3$: la capacité pour une heure du réservoir de routage (en mm)
- $X4$: le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (en h)

2. Méthodologie

2.1 Mise en place du modèle et procédure d'évaluation

Dans notre étude, nous nous intéressons seulement à la simulation, afin de voir comment se comporte le modèle hydrologique, sans les artefacts liés à l'assimilation de débit.

2.1.1 Procédure générale

La mise en place et l'évaluation du modèle hydrologique est traditionnellement réalisée à travers la procédure du split-sample test (Klemeš, 1986). Elle permet d'évaluer les performances du modèle lorsqu'il est appliqué dans des conditions différentes de celles du calage. Cela revient à diviser l'ensemble de la période d'étude du bassin en deux périodes P1 et P2. Le modèle est dans un premier temps calé sur P1 afin d'en déduire un jeu de paramètres qui permet de reproduire au mieux les débits observés, puis le débit est simulé en P2 avec les paramètres précédemment établis et on évalue les performances du modèle sur P2 en contrôle. Dans un deuxième temps, le calage se fait sur P2 et le contrôle sur P1 (Figure 9).

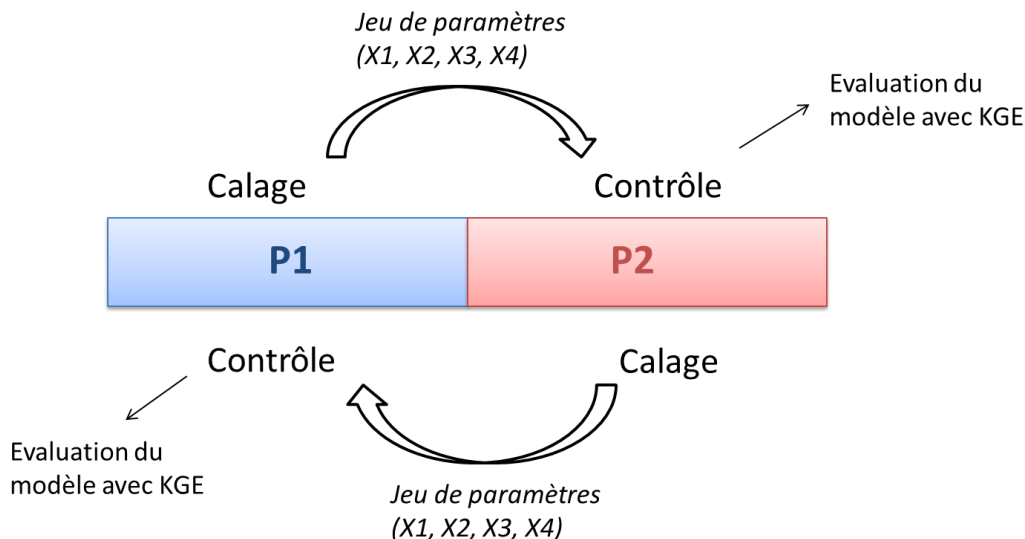


Figure 9 : Schématisation de la procédure de Calage-Contrôle. (Réalisation personnelle)

Le calage du modèle hydrologique est la phase pendant laquelle on cherche à optimiser les paramètres du modèle (X_1 , X_2 , X_3 et X_4) qui permettent de reproduire le plus fidèlement les débits sur une période considérée. Le jeu de paramètres optimal est déterminé sur une fonction objectif (critère de calage) qui exprime la différence entre observations et simulations. Ainsi le choix du critère de calage (2.1.2) va déterminer le calage des paramètres.

Les périodes de calage-contrôle P1 et P2 sont choisies en fonction de la concomitance des chroniques de P, ETP et Q et de manière à avoir les plus longues chroniques possibles. Le fait d'avoir de longues périodes permet de prendre en compte une plus large diversité d'évènements et ainsi de tester la robustesse des résultats. Les périodes sont alors différentes selon les bassins (A.6 Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant). Cela rend ainsi plus difficile l'interprétation et la comparaison des résultats entre les bassins.

2.1.2 Méthode de calage et d'évaluation du modèle

Le modèle est calé à l'aide d'une fonction objectif et évalué à l'aide d'un critère d'évaluation. Nous avons choisi le critère de Kling-Gupta : KGE (Gupta et al., 2009) qui est un critère couramment utilisé pour le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques.

Le critère KGE est né de la décomposition du NSE (Critère de Nash-Sutcliffe (1970)) en trois composantes : le rapport des variances des débits simulés et observés (α), l'erreur de bilan normée (β) et le coefficient de corrélation entre débits observés et simulés (r). La valeur 1 est l'optimum de ce critère.

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

2.2 Spatialisation des précipitations par bassin versant

Le modèle a besoin en entrée d'une pluie moyenne de bassin. Or nous avons des pluies ponctuelles par pluviomètre. Il est donc nécessaire d'interpoler spatialement les pluies des pluviomètres, pour obtenir une pluie précipitée sur la surface de bassin. Différentes méthodes de spatialisation existent. Deux méthodes simples ont été utilisées ici afin d'évaluer l'impact de la spatialisation des pluies sur la modélisation hydrologique : la méthode de Thiessen (Thiessen, 1911) et la méthode de la distance inverse (Shepard, 1968).

2.2.1 Spatialisation par la méthode de Thiessen

- Principe théorique

La méthode de Thiessen part du principe que la valeur mesurée à un pluviomètre peut être extrapolée à toute l'aire d'influence de ce pluviomètre (c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas un autre pluviomètre plus proche). Les aires d'influence des pluviomètres ou polygones de Thiessen sont tracées grâce aux médiatrices entre pluviomètres. En voici un exemple dans la **Figure 10**.

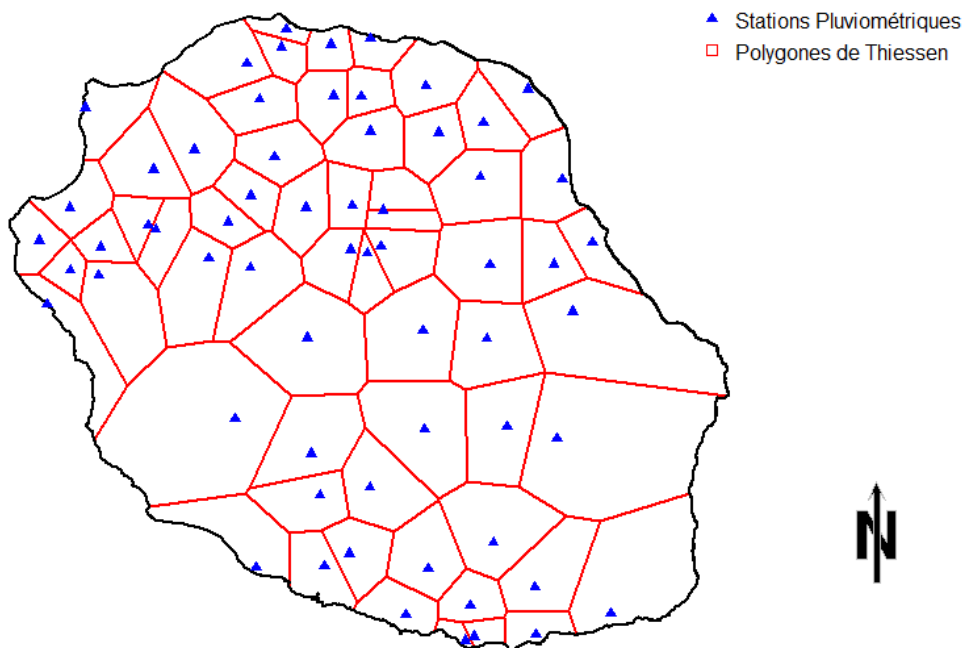


Figure 10 : Carte donnant un exemple de réseau de polygones de Thiessen dans le cas où tous les pluviomètres fonctionnent. (Réalisation personnelle)

La pluie par bassin est calculée en pondérant la valeur de chaque pluviomètre par son aire d'influence intersectée dans le bassin.

$$P = \frac{1}{S_{tot}} * \sum_{i=1}^n S_i * P_i \quad \text{Équation 2}$$

avec P la précipitation moyenne sur le bassin versant (en mm) ; P_i la précipitation du pluviomètre i (en mm) ; S_i la surface du polygone du pluviomètre i intersecté par le bassin (m^2) ; S_{tot} la surface totale du bassin versant (m^2) ; n le nombre de pluviomètres actifs.

La **Figure 11** illustre la formation des polygones de Thiessen par le positionnement des pluviomètres et la définition des aires d'intersection avec le bassin pour définir les coefficients pondérateurs.

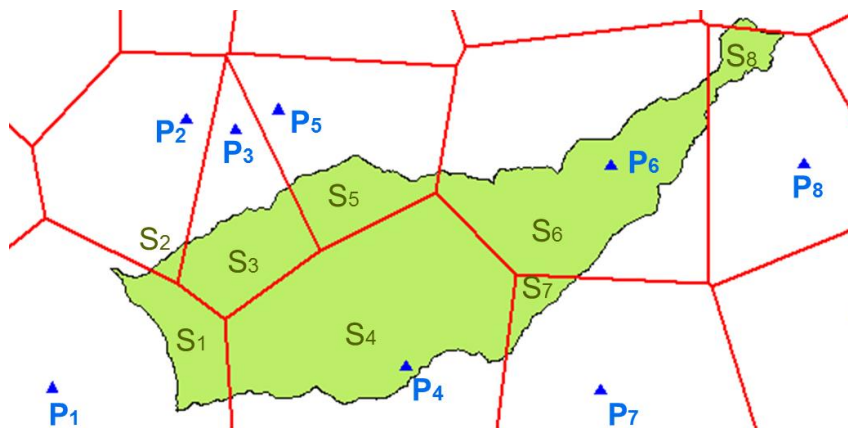


Figure 11 : Exemple de l'intersection des polygones de Thiessen avec le bassin 40120100, dans le cas où tous les pluviomètres sont actifs. (Réalisation personnelle)

La méthode de Thiessen est une méthode de spatialisation assez simple qui fonctionne en général bien dans les cas de territoires plans, sans relief pouvant influencer les précipitations (Ly et al., 2013).

- Réalisation à partir des données disponibles

Les chroniques de pluies sont entrecoupées de lacunes : la disponibilité des pluviomètres varie donc avec le temps. Ceci implique que le traçage des polygones et le calcul des coefficients par pluviomètre doivent être répétés à chaque fois qu'une nouvelle configuration de pluviomètres actifs se présente. Une routine déterminant l'ensemble des configurations de pluviomètres actifs différentes sur la période a été écrite, afin de pouvoir calculer les coefficients servant à moyenniser les pluies de bassin. Ainsi en cas de non fonctionnement des pluviomètres à proximité, les premiers actifs en s'éloignant sont utilisés afin de ne jamais avoir de lacunes dans les pluies de bassin.

La distance moyenne entre le centroïde des bassins et les pluviomètres utilisés dans le calcul des pluies de bassin a été calculée à chaque pas de temps afin de pouvoir faire a posteriori une analyse critique des valeurs de pluies de bassin ainsi calculées. Une distance trop grande peut en effet être porteuse d'incertitudes quant à la représentativité des pluies utilisées. Ceci est encore plus vrai sur l'île de la Réunion où les pluies peuvent être très localisées.

2.2.2 Spatialisation par la méthode de la distance inverse

- Principe théorique

La méthode de spatialisation par la distance inverse part du principe qu'au fur et à mesure que la distance entre deux points augmente, leur similarité diminue. C'est une interpolation non linéaire qui utilise une pondération égale à l'inverse de la distance au carré entre le pixel et le pluviomètre. Le territoire est découpé en une multitude de pixels. Chaque pixel se voit attribuer une pluie calculée comme ceci :

$$P_{pixel} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}} \quad \text{Équation 3}$$

avec P_{pixel} la précipitation estimée sur le pixel (en mm) ; P_i la précipitation du pluviomètre i (en mm) ; D_i la distance entre le pixel et le pluviomètre i (en m) ; n le nombre de pluviomètres actifs.

Cette méthode permet de donner plus de poids aux pluviomètres à proximité et moins à ceux étant éloignés. Cette méthode est considérée comme étant meilleure en contexte montagneux où le relief influence les précipitations (Ly et al., 2013).

- Réalisation à partir des données disponibles

Nous avons choisi de découper le territoire en pixels d'une résolution de 900 m par 900 m, afin d'allier rapidité de calcul et finesse des résultats.

Après avoir obtenu une valeur de pluie moyenne par pixel et par heure, les valeurs de pluies de ces pixels sont moyennées pour avoir une pluie moyenne par bassin. Les chroniques de pluies sont ainsi sans lacune.

Cette méthode permet d'observer une variabilité plus fine des pluies dans l'espace que la méthode de Thiessen.

2.3 Chronique d'ETP horaires

2.3.1 Etendre les données à d'autres années

De la même manière que pour les pluies, le modèle a besoin d'une chronique d'ETP de bassin en entrée. Les données ne commencent qu'en 1998 et en 2000 selon la station, il est nécessaire d'étendre les valeurs aux années précédentes où l'on souhaite faire la modélisation. Pour cela, nous avons moyenné pour chaque jour les valeurs d'ETP du même jour sur les années où les mesures sont présentes.

$$ETP(alt, j) = \frac{1}{n} * \sum_{an=1}^n ETP(alt, j, an) \quad \text{Équation 4}$$

Les chroniques d'ETP sont ainsi complétées avec les valeurs des moyennes journalières sur toutes les années disponibles.

2.3.2 Spatialiser l'ETP en fonction de l'altitude du bassin versant

Nous avons à disposition deux chroniques d'ETP : l'une mesurée à 8 m d'altitude au niveau de la mer et l'autre à 1560 m d'altitude dans la plaine des Cafres. Nous avons fixé arbitrairement la limite d'application à 700 m d'altitude : c'est-à-dire que pour tous points ayant une altitude inférieures à 700 m, l'ETP du littoral sera appliquée ; tandis que pour les points situés au-delà de cette limite, l'ETP de la plaine des Cafres sera appliquée (**Figure 12**).

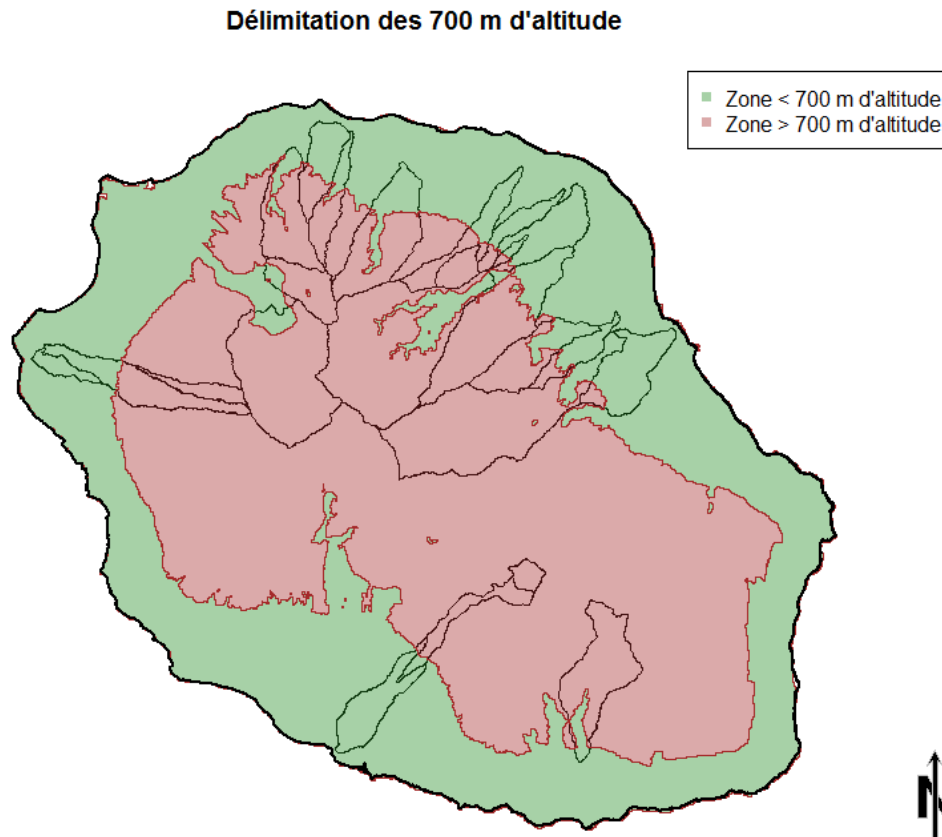


Figure 12 : Carte du zonage plus ou moins 700 m d'altitude. (Réalisation personnelle)

Pour chaque bassin, nous définissons la proportion de surface au-dessus ou en dessous de la limite de 700 m (grâce au MNT). L'ETP par bassin est ensuite calculée à partir de la pondération des deux types d'ETP par ces proportions.

2.3.3 Décomposer au pas de temps horaire

Les valeurs d'ETP sont au pas de temps journalier, or le modèle fonctionne au pas de temps horaire. Il est donc nécessaire de décomposer les valeurs journalières heure par heure. L'ETP n'est pas uniformément répartie sur les 24 h de la journée. Ici, une courbe simple a été utilisée, faisant l'hypothèse que l'ETP est maximale au moment le plus chaud de la journée (de 12h à 15h) et nulle lors de la nuit (de 20h à 8h). Les coefficients choisis sont ceux utilisés dans le modèle GRP (Berthet, 2010; Tangara, 2005) (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Coefficients de conversion de l'ETP journalière en ETP horaire

01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h
0	0	0	0	0	0	0	0.035	0.062	0.079	0.097	0.11
13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
0.117	0.117	0.11	0.097	0.079	0.062	0.035	0	0	0	0	0

2.4 Traitement des débits : Agrégation au pas de temps horaire

Les débits obtenus en stations sont au pas de temps variable, c'est-à-dire que lors des fortes variations de débits (crues ou décrues), les mesures sont rapprochées, alors qu'en situations stables, les mesures sont espacées dans le temps. Nous exploitons ici la méthode utilisée par FICCHI, (2017) qui permet d'interpoler le pas de temps variable en pas de temps horaire. Les hypothèses sont les suivantes : sont considérées comme lacunes les périodes de plus de 15 jours entre deux mesures ou les périodes de plus de 5 jours ayant une variation de débits supérieure à $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Résultats

Dans cette partie, l'ensemble des résultats obtenus sont présentés, à la fois ceux des données après le traitement (3.1, 3.2, 3.3) et ceux concernant les critères d'évaluation des simulations du modèle GR4H (3.4).

3.1 Critique des données de débit

Il est essentiel d'apporter un regard critique sur les données afin de déceler la présence éventuelle d'anomalies qui peuvent être préjudiciables à la modélisation hydrologique. Une première étape consiste à la critique visuelle des débits.

Les hydrogrammes des débits mesurés et agrégés à pas de temps horaire ont été analysés visuellement bassin par bassin et année par année (Figures suivantes). Certaines anomalies ou incertitudes peuvent être observées, nous en présentons ici quelques exemples.

L'ensemble des événements comprenant des anomalies est mis en lacune afin que le modèle ne soit pas impacté par ces données. En effet, le modèle se cale sur les débits observés, de mauvais débits peuvent amener à un mauvais calage du modèle ou alors à des résultats erronés.

- Déphasage des débits sur une période plus ou moins longue

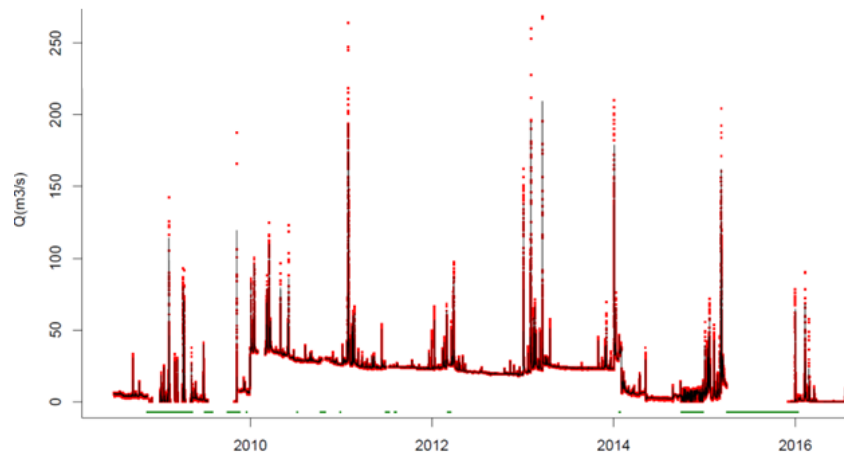


Figure 13 : Hydrogramme de la rivière des Pluies, au pont Domenjod (station 40310170), entre 2009 et 2016. (Réalisation personnelle)

La **Figure 13** présente les débits ponctuels (en rouge) et moyens horaires (en noir) pour la rivière des Pluies, au pont Domenjod. On observe un décrochement sur la période 2010-2014, probablement dû à une modification de la courbe de tarage (un détarage). Une modification du lit du cours d'eau par une crue peut entraîner une modification de la relation entre hauteur d'eau et débit, et ainsi mener à des motifs de débits anormaux.

Ce type de décrochage a été observé sur les rivières suivantes : Grande Rivière Saint-Jean (station 40300101), Petite Rivière Saint-Jean (station 40301090), et le Bras de Sainte Suzanne (station 40411000).

- Valeurs aberrantes :

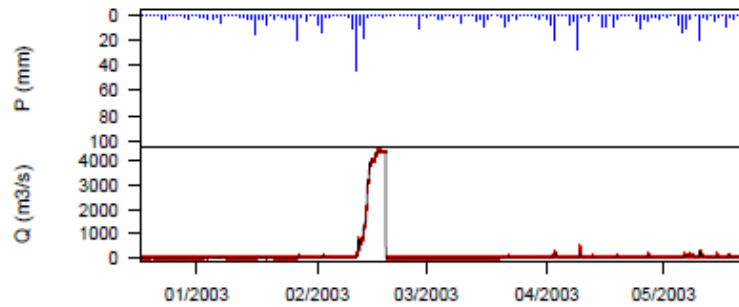


Figure 14 : Hydrogramme de la rivière du Mât, au Barrage (station 40220100), centré sur des données anormalement élevées de début 2003. (Réalisation personnelle)

De la même manière, la **Figure 14** présente les débits ponctuels (en rouge) et moyens horaires (en noir) pour la rivière du Mât, au Barrage (station 40220100). On observe un pic de crue à plus de 4000 m³/s, sans que celui-ci ne soit suivi d'une décrue. Cela semble être aberrant pour une rivière qui a un débit moyen de 25 m³/s en saison humide. Ce type d'anomalie peut être expliqué par une erreur de capteur de mesure.

Ce type d'anomalies a aussi été observé sur la Rivière des Marsouins (station 40120100).

- Comportement hydrologique douteux :

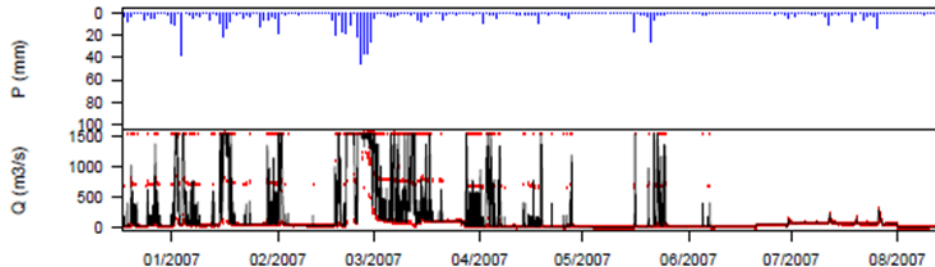


Figure 15 : Hydrogramme de la rivière du Mât, au Barrage (station 40220100), centré sur des données douteuses. (Réalisation personnelle)

La **Figure 15** présente également les débits ponctuels (en rouge) et moyen horaire (en noir), pour la rivière du Mât. On remarque que sur cette période, les données de débits ponctuels sont extrêmement fluctuantes et suivent des paliers vers 700 et 1600 m³/s sans qu'il n'y ait de valeurs intermédiaires. Des telles variations de débits n'ont pas de sens hydrologique et sont par conséquent difficilement modélisables avec GR4H.

Après la mise en lacune des différentes zones d'incertitudes, les périodes d'application du modèle sont établies. Un minimum de quatre ans, avec des données de pluies de bassin continues (sans lacunes) et des données de débits les plus complètes possible, est requis pour que le modèle fonctionne au mieux. La recherche des périodes d'application du modèle s'est faite au cas par cas en fonction de la qualité des données (A.6 Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant). Ceci nous a aussi menés au retrait de trois des bassins (40510141, 40620112 et

40310170). En effet, ces bassins ne possèdent pas de chroniques de débits de qualité et de longueur suffisante.

3.2 Spatialisation des pluies

Avec la méthode de spatialisation des pluies par l'inverse de la distance, une représentation cartographique des pluies est possible.

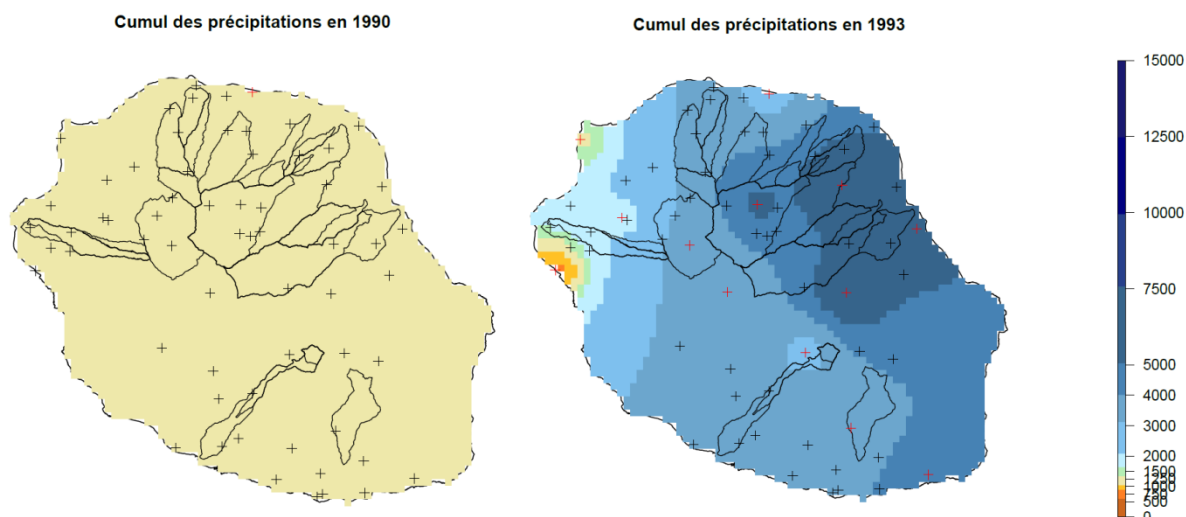


Figure 16 : Cartographie de la pluviométrie annuelle (en mm) sur l'île de la Réunion pour les années 1990 (à gauche) et 1993 (à droite), calculée avec la méthode de l'inverse distance à partir des pluviomètres actifs (croix rouges). (Réalisation personnelle)

La **Figure 16** représente le cumul des précipitations annuelles calculé avec la méthode de l'inverse distance, pour les années 1990 et 1993. Les marqueurs ponctuels en forme de croix indiquent le positionnement de l'ensemble des pluviomètres, en rouge sont ceux étant actifs durant l'année d'étude.

On remarque qu'en 1990, un seul pluviomètre a fourni des données de précipitations. La pluie spatialisée venant des mesures de l'unique pluviomètre donne l'impression d'une pluie homogène sur l'île. Ce n'est évidemment pas le cas en réalité, il faut donc se méfier des années où peu de pluviomètres sont disponibles pour la spatialisation des précipitations. En comparaison, en 1993, la pluie a pu être spatialisée à partir de 13 pluviomètres, ce qui permet de représenter plus finement la variabilité spatiale des précipitations.

Ainsi il serait préférable d'enlever des périodes d'étude toutes les années avant 1993, car un seul pluviomètre ne permet pas de représenter la variabilité spatiale des précipitations. Seulement deux bassins versants (R0046050 et R0027044) ont des périodes d'étude commençant avant 1993 (respectivement janvier 1990 et janvier 1991). Il est alors possible si le pluviomètre utilisé est loin, que les précipitations ne soient pas représentatives des bassins. Les périodes ne devraient pas être prises en compte dans la modélisation.

Etant donné que la spatialisation des pluies a été réalisée par deux méthodes, une comparaison entre les deux est nécessaire.

Les deux méthodes de spatialisation des pluies sont confrontées dans la **Figure 17**, où les pluies de l'inverse distance moyennes par bassin sont mises en fonction des pluies de Thiessen moyennes par bassin. La droite rouge représente la relation $x=y$.

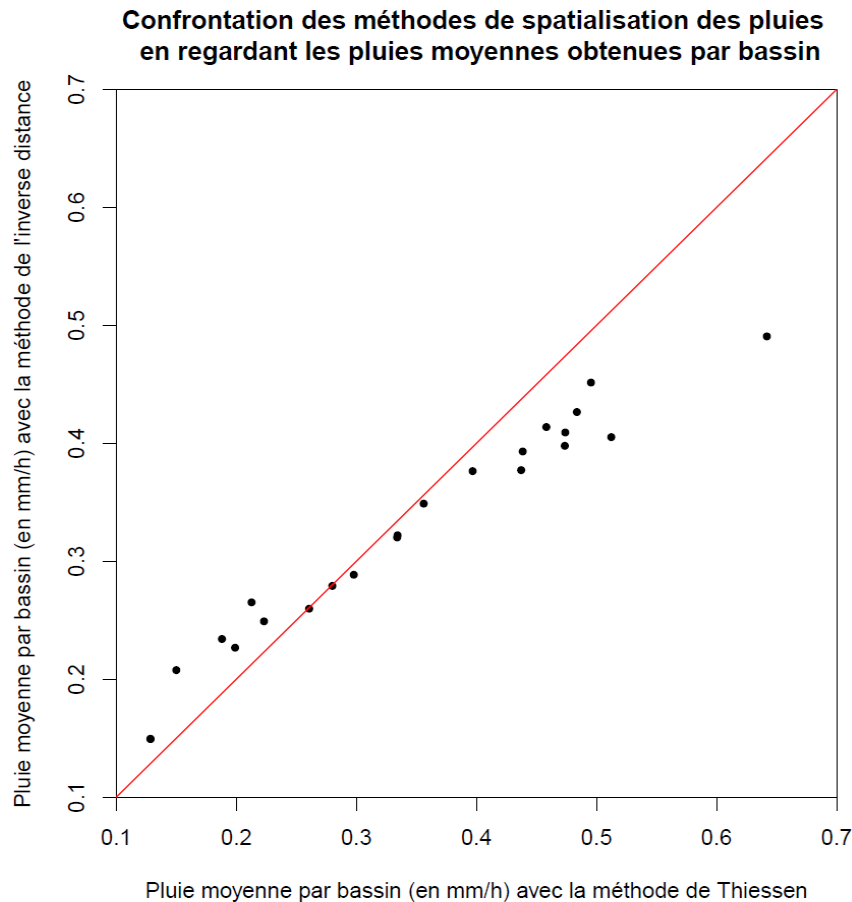


Figure 17 : Comparaison des pluies moyennes de bassins selon leur méthode de spatialisation. (Réalisation personnelle)

Une relation semble exister entre les deux méthodes, cependant elle s'éloigne de la droite $x=y$ lorsque les valeurs de pluies sont extrêmes. Les bassins pour lesquels les précipitations sont faibles, ont des pluies plus importantes avec la méthode de l'inverse distance qu'avec celle de Thiessen (jusqu'à +25%). L'inverse se produit pour les bassins avec des précipitations plus élevées : la méthode de Thiessen donne des valeurs plus élevées que la méthode de l'inverse distance (jusqu'à +25%). Les différences de pluies moyennes annuelles peuvent donc être très importantes et avoir à priori un impact sur la modélisation.

On remarque donc que la gamme de valeurs des précipitations de Thiessen est plus étendue que celle de l'inverse distance (Figure 17). C'est-à-dire que les précipitations de Thiessen vont plus dans les extrêmes : quand il ne pleut pas beaucoup, les pluies sont encore plus faibles et quand il pleut beaucoup, les pluies sont plus importantes, en comparaison aux précipitations de l'inverse distance. Avec la méthode de Thiessen, les précipitations moyennes sur l'année vont de 0,12 mm/h pour les bassins les moins arrosés à 0,65 mm/h pour les bassins les plus arrosés. Tandis que les précipitations issues de l'inverse distance sont plus contenues, allant de en moyenne 0,15 mm/h pour les bassins les moins arrosés à 0,48 mm/h pour les bassins les plus arrosés. Ceci vient du fait que la méthode de Thiessen utilise les pluviomètres les plus proches sans aucune influence des autres pluviomètres plus éloignés. Alors que la méthode de l'inverse distance donne

du poids même aux pluviomètres plus éloignés. Ce sont ces pluviomètres supplémentaires (bien que pondérés par l'inverse de la distance) qui vont nuancer les valeurs de pluviométrie.

La répartition géographique des différences entre les deux méthodes (**Figure 18**), montre de manière visuelle la localisation des zones où les pluies de Thiessen sont plus importantes par rapport aux pluies de l'inverse distance (zones en bleu foncé) et inversement les zones où la pluie de l'inverse distance sont plus importantes que celles de Thiessen (en jaune et rouge).

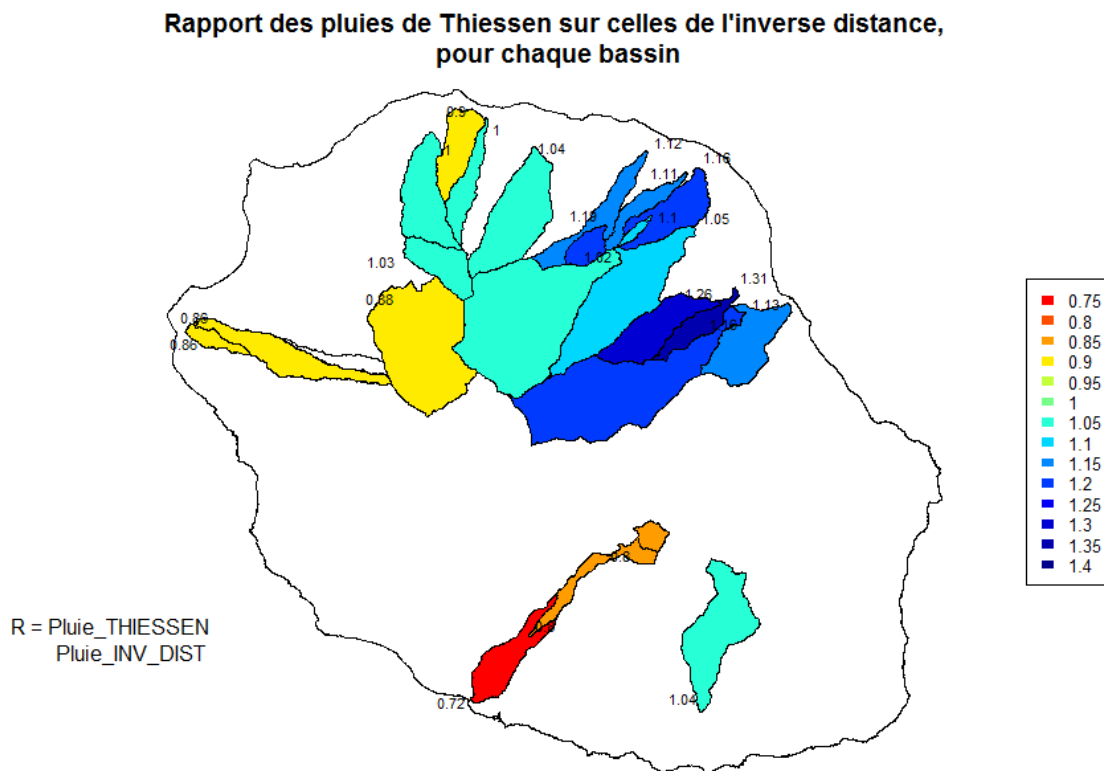


Figure 18: Carte de la variation des pluies cumulées calculées selon les différentes méthodes. (Réalisation personnelle)

On observe un comportement différent en fonction de la position géographique des bassins versants :

- Là où il pleut beaucoup (principalement à l'Est), la méthode de Thiessen donne des pluies plus importantes que la méthode de l'inverse distance.
- Là où il pleut moins (à l'Ouest de l'île), c'est la méthode de l'inverse distance qui donne des pluies plus importantes que la méthode de Thiessen.

Afin de simplifier la compréhension, la suite du rapport (à partir du paragraphe 3.3) ne présente que les résultats issus de la méthode de spatialisation des pluies par l'inverse de la distance. Cette méthode est conseillée lorsque les précipitations sont influencées par le relief (Ly et al., 2013). Le

travail a cependant été également fait avec les pluies issues de la méthode de Thiessen et les résultats obtenus présentent les mêmes tendances.

3.3 Etude des bilans en eau

Il est également intéressant de se pencher sur la relation entre les variables de pluies, débits et ETP à travers l'étude des bilans en eau des bassins versants. Les bilans en eau sont une autre façon de représenter le graphique adimensionnel Turc-Budyko (Andréassian et Perrin, 2012). Ils permettent de caractériser les bassins versants en fonction de leurs trois variables : débit (Q), précipitation (P) et évapotranspiration (E).

Le rapport débit sur pluie (Q/P) est représenté en fonction du rapport de la pluie sur l'évapotranspiration potentielle (P/E).

- Si le bassin versant se situe au-dessus de la droite d'ordonnée $Q/P=1$ (en bleue, **Figure 19**), cela signifie que $Q>P$, les débits sont supérieurs aux précipitations. Le bassin est alors qualifié de « Gaining catchment », les causes possibles peuvent être entre autres des apports naturels de bassins voisins, ou bien des problèmes d'estimation dans les données : une surestimation du débit ou une sous-estimation de la pluie comme ça peut être le cas en zone montagneuse.
- Si le bassin versant se situe en dessous de la courbe $Q=P-E$ (en rouge, **Figure 19**), alors $Q<P-E$, les pertes en eau sont plus importantes que les pertes évaporatoires maximales. Le bassin perd donc de l'eau, il est qualifié de « Leaking catchment ». Ceci peut être dû à de l'infiltration de l'eau dans un aquifère profond ou vers un bassin voisin, ou à des problèmes d'estimation de certaines données : une sous-estimation du débit ou encore une surestimation de la pluie ou de l'ETP.

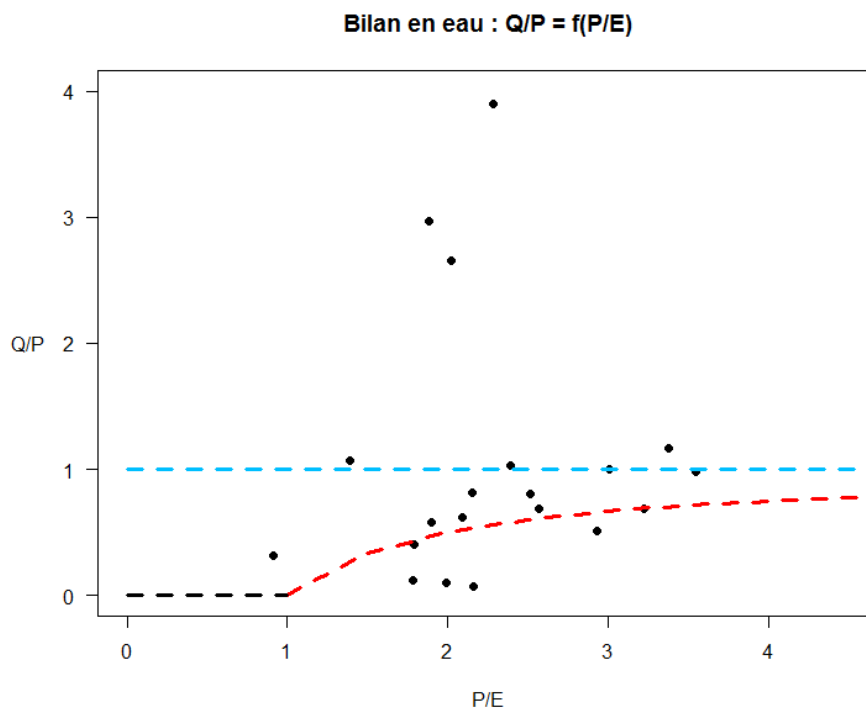


Figure 19 : Bilans en eau sur 20 bassins versants réunionnais, réalisés avec les pluies calculées par l'inverse distance. (Réalisation personnelle)

La **Figure 19** met en évidence que dix des vingt bassins versants à l'étude ont un déséquilibre dans leur bilan en eau :

- Cinq d'entre eux ont des débits excédentaires par rapport aux pluies ou des pluies insuffisantes pour les débits observés. Pour trois d'entre eux, ce déséquilibre est très important : les débits cumulés sont plus de deux fois plus importants que les précipitations cumulés sur le bassin. Par exemple, le bassin 40300110 (rivière Sainte-Suzanne à Niagara) présente des débits moyens annuels 4 fois supérieurs à la pluie moyenne annuelle.
- Les cinq autres ont au contraire des débits faibles vis-à-vis des pluies ou alors ces dernières sont trop importantes. Par exemple, le bassin R0045056 (rivière Blanche à La Chatoire) présente des pluies moyennes annuelles 13 fois supérieures aux débits moyens annuels.

Différentes hypothèses explicatives peuvent être proposées : entre surestimation ou sous-estimation des pluies ou des débits.

La répartition géographique des BV peut apporter des explications à la présence de bassins versants gagnant ou perdant de l'eau.

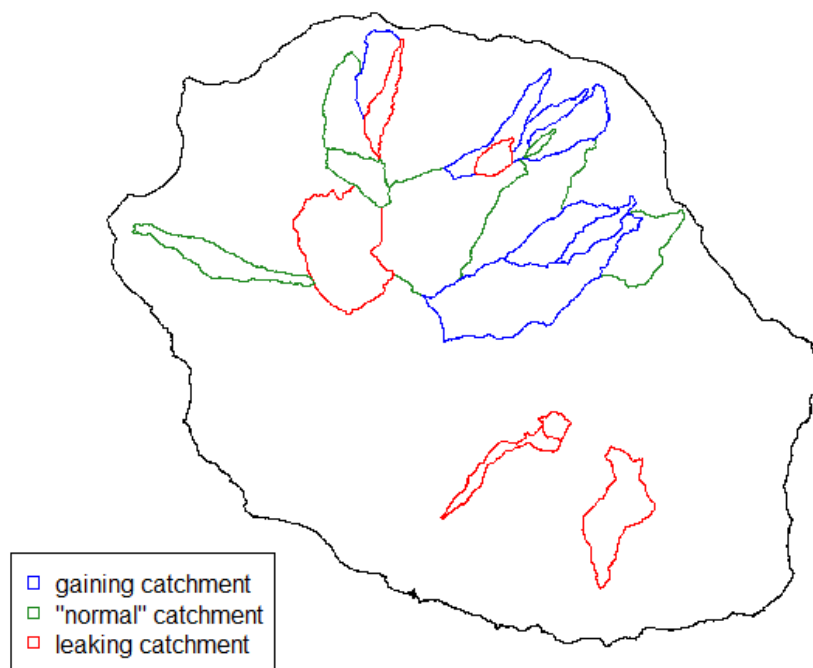


Figure 20 : Répartition géographique des différents types de bilan des bassins. (Réalisation personnelle)

Sur la **Figure 20**, les bassins versants en bleu, ceux gagnant de l'eau (possible surestimation du débit ou sous-estimation de la pluie), sont principalement situés au Nord Est de l'île, où les précipitations sont particulièrement fortes.

Des liens avec les différences des méthodes de spatialisations sont possibles. Il semblerait que les bassins versants manquant de précipitations (en bleu) soient aussi ceux où les précipitations de Thiessen sont plus importantes que celles de l'inverse distance. A l'inverse, les bassins ayant trop de précipitations (en rouge) correspondent à des bassins où ce sont les précipitations de l'inverse distance qui sont plus fortes que celles de Thiessen. On pourrait penser que les pluies Thiessen sont donc « meilleures », car elles vont à chaque fois dans le sens de l'atténuation des surestimations ou sous-estimations des précipitations. Or les résultats obtenus avec les

précipitations spatialisées de Thiessen donnent les mêmes tendances. Les éventuels problèmes de sur ou sous-estimation ne proviennent probablement pas du choix de la méthode spatialisée.

Ce type d'observation des proportions/équilibres entre variables permet une première évaluation des données d'entrée du modèle hydrologique. Ceci peut par la suite influencer les performances de la modélisation.

3.4 Résultats de la modélisation GR4H

3.4.1 Les performances du modèle

Les performances du modèle sont évaluées après le calage et le contrôle à l'aide du critère KGE. Les performances sont meilleures lorsque le KGE se rapproche de la valeur 1. (cf 2.1.2).

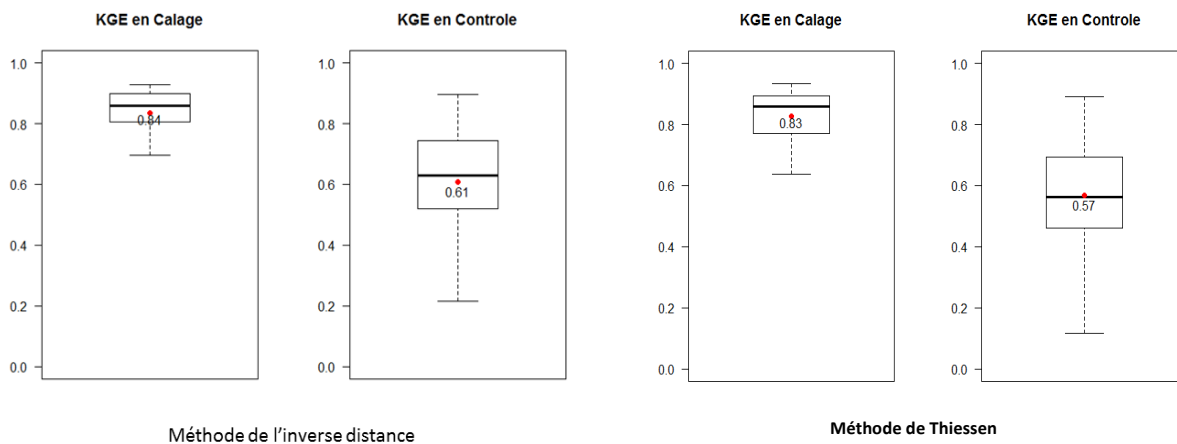


Figure 21 : Boxplots de la distribution des valeurs de KGE sur l'ensemble des modélisations, pour la phase de calage et celle de contrôle. (Réalisation personnelle)

Ces deux boxplots représentent la distribution des performances du modèle en phase de calage (à gauche) et en phase de contrôle (à droite) pour l'ensemble des simulations pour les 20 bassins, et avec les pluies issues des deux méthodes de spatialisation testées. La barre en gras représente la médiane, le point rouge correspond à la moyenne, les limites de la boîte sont le quantile Q1 à 25% pour la partie inférieure et le quantile Q3 à 75% pour la partie supérieure, et les bornes sont les quantiles à 5% et 95%.

Avec des précipitations issues de la spatialisation de l'inverse distance, les critères d'évaluation KGE en phase de calage sont compris entre 0.56 et 0.94. Tandis qu'en phase de contrôle, le KGE s'étend entre 0.02 et 0.93. La moyenne de tous les critères est de 0.84 en calage, contre 0.61 en contrôle. Le modèle fonctionne donc assez bien en calage. Mais les résultats sont bien plus mitigés en contrôle, puisque plus de la moitié des bassins versants obtient un KGE inférieur à 0.6.

Avec les précipitations de Thiessen, les résultats sont un peu moins bons, mais ils expriment aussi la même tendance à se dégrader en phase de contrôle.

Le fait d'avoir des résultats moins bons en contrôle qu'en calage est normal, puisque la phase de calage est celle qui optimise justement ce critère KGE. Mais la très forte dispersion des valeurs de KGE lors de la phase de contrôle souligne l'hétérogénéité des résultats. Certains bassins versants présentent des performances médiocres en contrôle, comme par exemple le bassin R0045056, sur la ravine Blanche, à Chatoire, qui obtient un KGE de contrôle moyen sur P1 et P2 de 0,17 contre 0,70 en calage.

Deux hypothèses sont alors envisageables :

- Soit le modèle ne se comporte pas bien sur ces bassins versants, car les paramètres de calage n'ont pas bien été identifiés et se trompent en contrôle. Cela peut être le cas si un changement majeur de comportement du cours d'eau intervient entre les deux périodes de l'étude.
- Soit ce sont les données obtenues après traitements (de pluies spatialisées obtenues à partir d'un réseau de pluviomètres instable entre deux périodes, de débits agrégés et/ou ETP horaires) de ces bassins qui ne sont pas cohérentes et qui ne permettent pas de modélisation hydrologique.

Pour les quelques bassins où les performances sont bonnes en contrôle (40220100, 40300110, 40130131, 40301190), on pourrait envisager de réaliser des tests en prévision par exemple.

Afin de mieux contextualiser ces résultats, nous avons géo-localisé ces critères KGE sur les différents bassins versants :

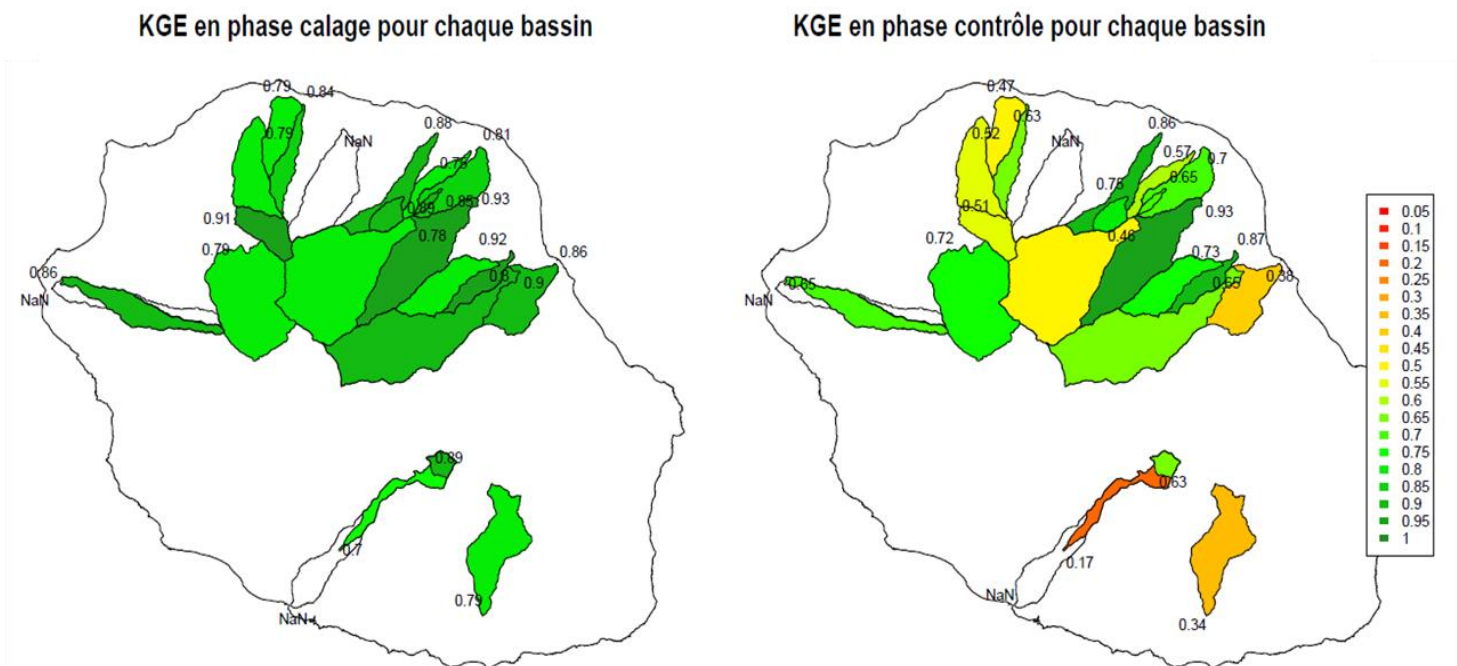


Figure 22 : Critères d'évaluation KGE, en phase de calage (à gauche) et de contrôle (à droite), répartis géographiquement. (Réalisation personnelle)

Les 'NaN' correspondent aux trois bassins ayant été écartés de l'étude après l'observation des chroniques de débits (cf. 3.1).

La **Figure 22** illustre les performances du modèle GR4H à travers le critère KGE sur les différents bassins versants. Les valeurs présentées sont des moyennes de KGE sur la période P1 et P2. Il apparaît que ni la localisation géographique, ni la taille des bassins n'a de relation directe avec la qualité de la modélisation. De plus, lorsque l'on cherche à relier les performances de modélisation aux bilans en eau des bassins, on remarque que les bassins où on suspecte des sur ou sous-estimation de la pluie (sur les bassins du nord-est par exemple), ne sont pas forcément ceux où les

performances du modèle chutent en contrôle. Il n'y a donc pas forcément de lien entre les conclusions des bilans en eau (i.e. les catégories de bassins) et les performances du modèle.

Il est intéressant d'approfondir l'étude des bassins pour lesquels les performances diminuent significativement en contrôle, à l'aide de l'observation des hydrogrammes des débits simulés par rapport aux débits observés (cf. Discussion).

3.4.2 Les paramètres du modèle

- Différence de jeux de paramètres entre deux périodes

Le modèle GR4H possède un jeu de quatre paramètres X_i qu'il cherche à optimiser en phase de calage. Le modèle ajuste son jeu de paramètres X_i afin que les débits simulés en sortie de modèle se rapprochent au mieux des débits observés. Les paramètres X_i peuvent donc être « forcés » ou « tordus » afin de donner des débits simulés au plus proche de ceux observés. Pour certains bassins, on observe des jeux de paramètres très différents entre les deux périodes, ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle adapte ses paramètres aux conditions spécifiques de la période.

- Cas particulier de X_2

Nous avons également observé un comportement particulier du paramètre X_2 qui est le coefficient d'échanges souterrains. Celui-ci peut être interprété comme un apport en eau (si X_2 positif) ou une fuite (si X_2 négatif) d'eau dans la partie souterraine du bassin versant. C'est l'un des deux paramètres dans le modèle GR4H (avec X_1) permettant d'équilibrer le bilan en eau.

Sur des bassins étant qualifiés de « normaux » (i.e. n'ayant pas une hydrogéologie trop particulière comme les zones karstiques par exemple), la totalité d'eau échangée (en apport ou en fuite) ne dépasse pas 10% de la totalité des précipitations du bassin. Nous avons alors calculé pour chacun des bassins, le cumul des échanges (L) sur le cumul des précipitations (P).

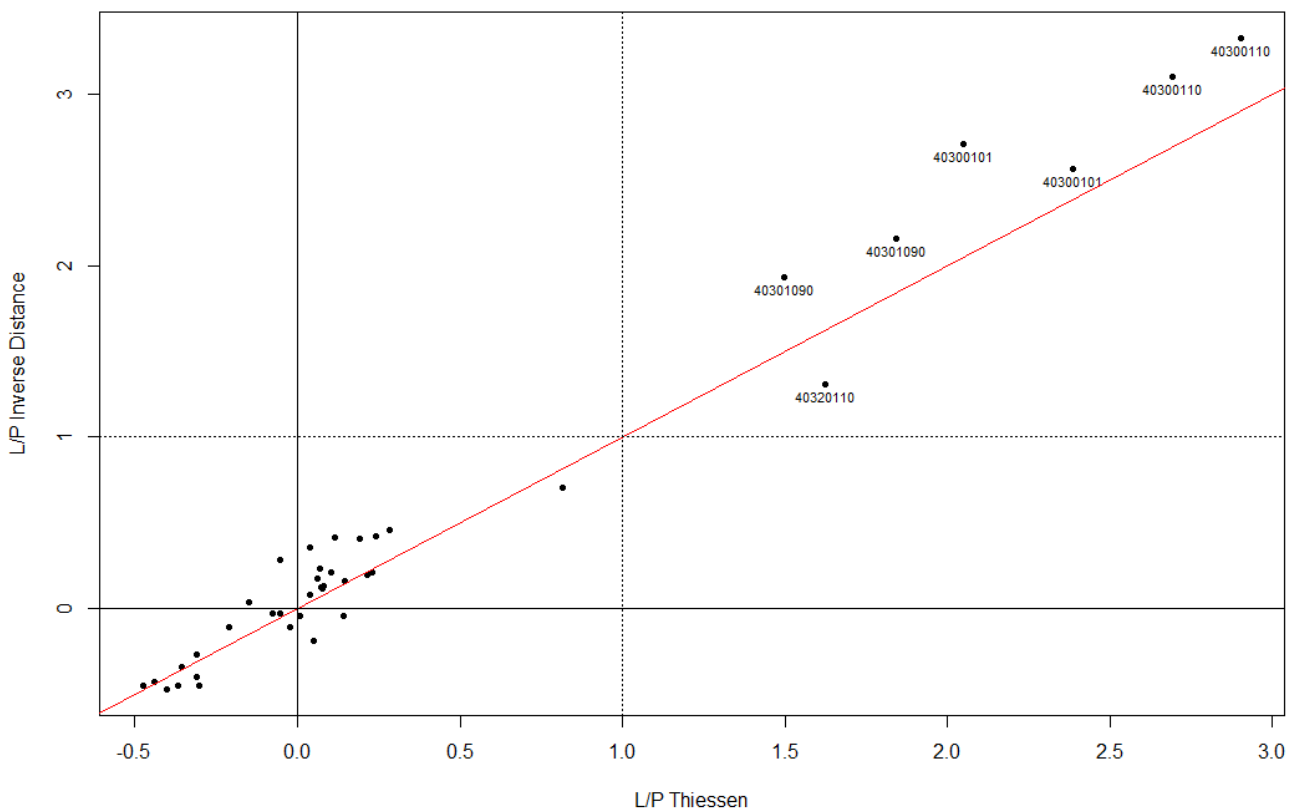


Figure 23 : Graphique représentant les rapports des échanges cumulés sur les précipitations cumulées en fonction de la méthode de spatialisation des pluies. (Réalisation personnelle)

La **Figure 23** représente les rapports des cumuls d'échanges par les cumuls de précipitations en fonction de la méthode de spatialisation des précipitations, pour tous les bassins versants. Lorsqu'un rapport est négatif, cela signifie que le bassin a tendance à fuir. Un rapport positif correspond à un bassin pour lequel le modèle apporte de l'eau afin de boucler son bilan en eau, c'est-à-dire qu'il n'a pas assez de pluie pour simuler des débits aussi importants que ceux observés. Si le rapport L/P est plus grand que 1, alors l'apport en eau du modèle est plus important que la quantité d'eau précipitée sur le bassin.

Pour les bassins 40300110, 40300101, 40301090 et 40320110, la part d'échanges souterrains est nettement supérieure à la quantité de précipitations. Les échanges sont de valeurs positives, ce sont donc des apports en eau de la part d'aquifères ou de bassins voisins. Ceci est valable quel que soit la méthode de spatialisation des précipitations.

Les quatre bassins ici mis en évidence sont les mêmes que ceux qualifiés de « gaining catchment » lors du bilan en eau (3.3 Etude des bilans en eau), c'est-à-dire ceux qui avaient des débits observés bien supérieurs aux précipitations. Cela traduit en effet la même notion : les débits observés sont trop importants par rapport aux précipitations, il n'est donc pas possible que les débits proviennent de la transformation seule des précipitations, un apport en eau est forcément introduit. Cet apport correspond au paramètre X2.

Avoir des apports d'eau par échange plus importants que la précipitation paraît peu réaliste. Le paramètre X2 semble avoir été forcé. Le modèle a besoin de beaucoup plus d'eau en entrée pour simuler les débits observés, ne trouvant pas cette quantité d'eau dans les données d'entrée de précipitation le modèle en apporte artificiellement avec le paramètre X2.

Différentes hypothèses sont envisageables :

- Soit les précipitations ont été sous-estimées lors de la spatialisation des pluies. Ceci pourrait être dû à une mauvaise prise en compte d'évènements pluvieux localisés non captés par les pluviomètres ou à un biais lié à la configuration du réseau (par exemple des postes situés en fond de vallée captant des précipitations bien inférieures à ce qu'elles sont sur les parties les plus amont du bassin).
- Soit les débits sont surestimés, ce qui pourrait venir d'un problème dans la courbe de tarage par exemple.

En se basant sur l'hypothèse que ce sont les précipitations qui sont sous-estimées sur certains bassins versants, il est intéressant de tester l'effet sur la modélisation hydrologique d'une correction des précipitations par un coefficient multiplicateur. Pour cela, nous avons testé une méthode qui consiste à fixer le paramètre X2 ce qui permet de boucler le bilan en eau pour empêcher les échanges et d'essayer de reproduire les débits avec des pluies corrigées. Différents coefficients multiplicateurs correcteurs de pluie (1, 1.25, 1.5, 2, 2.5, 3 et 4) ont été appliqués. Le critère KGE est utilisé pour évaluer la bonne reproduction des débits. Le coefficient correcteur de la pluie permettant de reproduire au mieux les débits est 2,5 (cf. A.9 Tests pour une correction des précipitations).

Pour les 4 bassins grandement déficitaires en eau, les nouvelles simulations avec des précipitations 2,5 fois plus importantes donnent des valeurs d'apport en eau (X2) bien plus cohérentes que sur les simulations précédentes (cf. A.9 Tests pour une correction des précipitations).

L'ensemble de ces résultats nous amène à mieux connaître les données d'entrée et à pouvoir ainsi les critiquer. Nous avons pu voir que les bassins de la Réunion ne se comportent pas tous de la même manière au cours de la modélisation hydrologique.

4. Discussion

L'objectif de cette partie est de revenir sur les bassins où la modélisation n'a pas de performances très satisfaisantes et d'en comprendre les raisons. L'observation des hydrogrammes des débits simulés/observés et des jeux de paramètres après calage permet d'expliquer quelques dysfonctionnements.

4.1 L'influence des précipitations

Comme vu précédemment, les précipitations sont très probablement sous-estimées sur certains bassins. Cela peut s'observer à travers l'étude des bilans en eau et la valeur du paramètre X2 qui permet de boucler le bilan hydrologique. Le modèle est cependant capable de se caler avec des paramètres qui lui permettent d'être bon en calage. Mais lorsque l'on passe en contrôle, les performances chutent. Est-ce que cette perte de performance peut s'expliquer par les données de précipitations ?

Nous avons remarqué sur le bassin de la rivière Langevin, à la Passerelle (station R0046050), l'absence totale de précipitation pour l'année 1992. En étudiant la provenance des données de précipitations, il s'avère que cela vient à la fois de l'utilisation d'un unique pluviomètre (97412336_C1h) et de la défaillance de celui-ci sur cette année 1992. Les valeurs de précipitations sont donc à zéro, ce qui paraît peu probable en réalité. N'ayant pas de données de précipitations sur une longue période, les débits simulés par le modèle décroissent jusqu'à zéro et le modèle est alors incapable de reproduire des pics de crues juste après la période d'absence de précipitation. Il faut attendre de nouveau que ses réservoirs se remplissent.

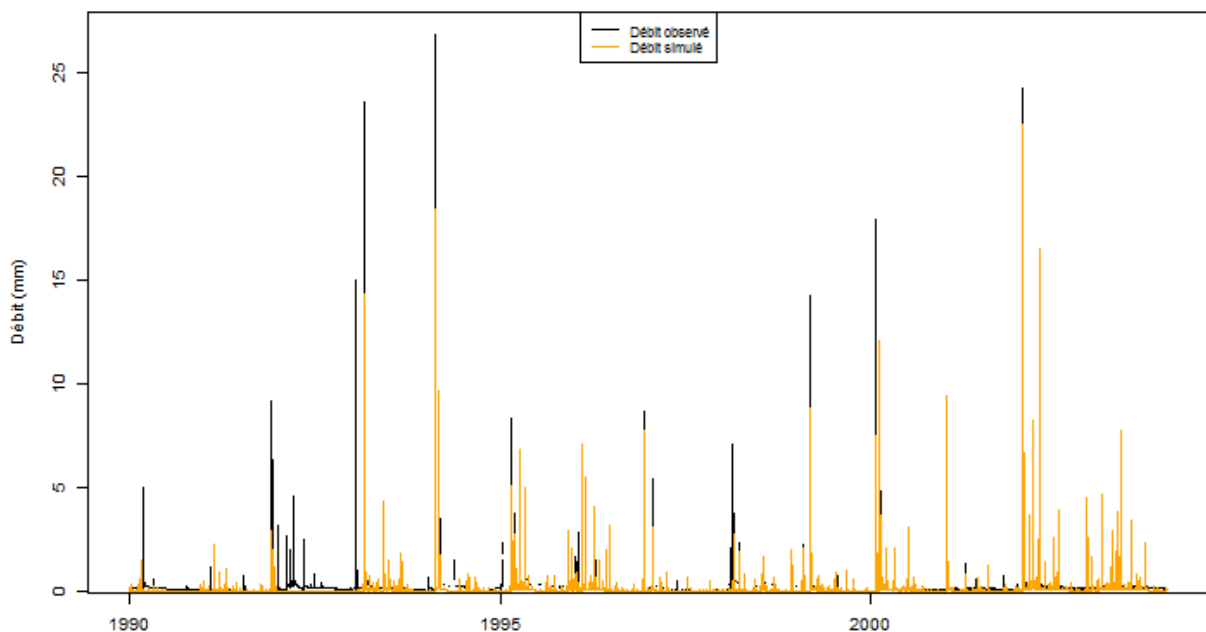


Figure 24 : Hydrogrammes observé et simulé de la rivière Langevin, à la Passerelle (station R0046050), sur la période P1, modélisation avec le jeu de paramètres de la période P2. (Réalisation personnelle)

La **Figure 24** représente les chroniques de débits observés (en noir) et simulés (en jaune). On remarque que le modèle a tendance à sous-estimer les débits lors des pics de crues. De plus

l'absence de débits simulés sur 1992 correspond bien à la période de défaut de précipitations. Cette période contribue à l'erreur du modèle et impacte les performances du modèle qui passe de 0,79 en calage à 0.39 en contrôle.

Les problèmes de cette nature sont bien visualisables sur des graphes QQplots, où le cumul des débits simulés est représenté en fonction du cumul des débits observés (**Figure 25**). Ce type de graphique est un outil pratique pour diagnostiquer des problèmes liés aux données, soit les débits observés, soit les précipitations de bassin calculées. En cas de modélisation parfaite des débits, la courbe est une droite de pente 1:1. Si des portions de droites verticales ou horizontales sont observées, alors il y a des différences entre l'hydrogramme observé et celui simulé.

- Une portion de droite horizontale correspond à une augmentation du cumul de débits observés sans aucune augmentation des débits simulés. Cela peut par exemple signifier un problème dans les précipitations : la rivière a réagi à un évènement que le modèle n'a pas pu reproduire parce qu'aucune précipitation n'est calculée avec la méthode de spatialisation. Ceci peut être expliqué par des pluviomètres utilisés qui sont trop loin et que l'évènement soit localisé et donc non capté par les pluviomètres utilisés. Une portion de droite horizontale peut également signifier un problème dans les données de débits, par un défaut de capteur par exemple.
- Une portion de droite verticale correspond à une augmentation du cumul de débit simulé sans augmentation des débits observés. Ceci peut indiquer des problèmes dans les pluies, comme précédemment avec des pluviomètres utilisés qui sont trop loin du bassin versant et qui apportent des valeurs de précipitations non représentatives de la pluie réellement tombée sur le bassin.

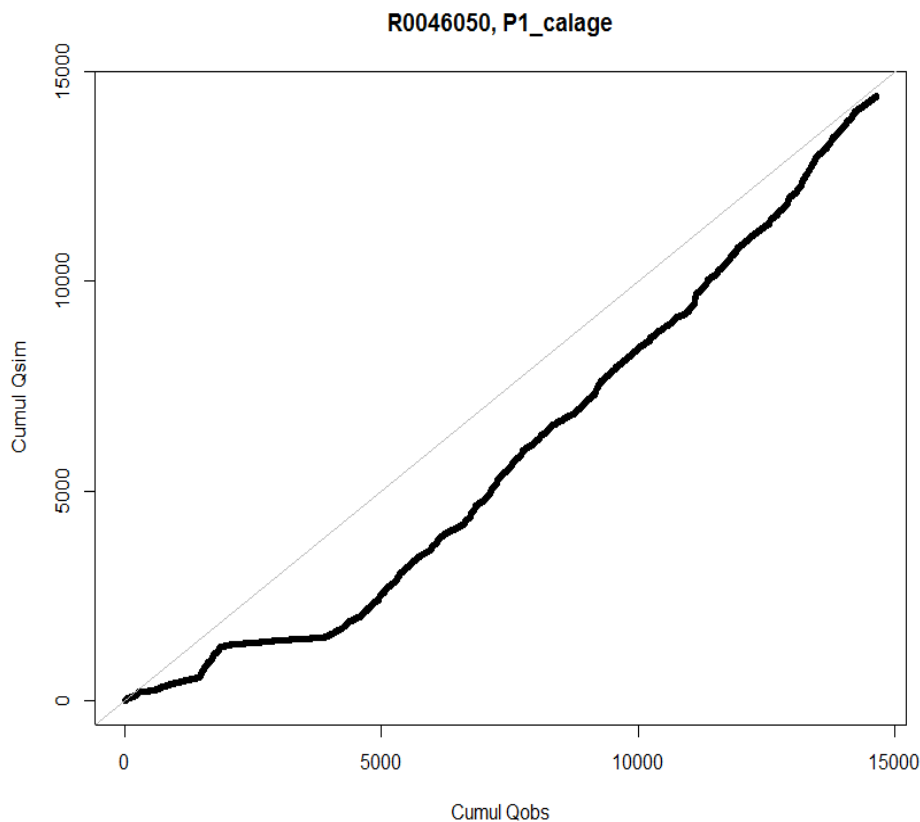


Figure 25 : Graphique des cumuls de débits simulés en fonction des cumuls de débits observés, pour la rivière Langevin, à la Passerelle (station R0046050). (Réalisation personnelle)

Sur la **Figure 25**, on observe bien la phase où aucun débit n'a été simulé par défaut de précipitations, celle-ci correspond à l'année 1992.

Une façon d'améliorer les données de précipitations serait de combiner les sources d'informations de pluviométrie entre les postes pluviométriques et les radars par exemple. L'île de la Réunion possède en effet deux radars : le radar du Colorado et celui de Piton Villers (*Rapport final projet PRECYP, 2014*). Les pluviomètres servent à caler les radars et les radars fournissent les données directement spatialisées des précipitations. L'exploitation de travaux antérieurs sur le calcul des normales climatiques, avec des méthodes tenant compte des effets orographique ou de la distance à la mer, pourrait également permettre de corriger les biais identifiés.

4.2 L'influence des débits

La mesure des débits a un impact dans le calcul des performances du modèle, puisque les débits observés sont utilisés dans le calcul du critère d'évaluation KGE. Or les débits mesurés ne sont pas toujours très fiables (cf. 3.1 Critique des données de débit). En effet, la relation hauteur-débit de la courbe de tarage est souvent détarée après le passage d'événements intenses qui déforment le lit des cours d'eau. L'incertitude est encore plus importante pour les hauts débits, car la relation hauteur-débit est extrapolée à partir des points jaugés, qui ne sont généralement pas mesurés en période de très hautes eaux (problèmes de sécurité, difficultés météorologique ou d'être sur place au moment du pic de crue). Ceci signifie que des changements de comportement hydrologique peuvent être générés artificiellement dans la chronique de débit, alors qu'en réalité aucun changement n'a lieu.

La modélisation peut apporter des informations sur d'éventuelles difficultés dans les données, mais ce n'est pas pour autant que le modèle indique les vraies valeurs à retenir. Ceci suggère qu'il est profitable de travailler conjointement avec les équipes d'hydrométrie pour mieux comprendre les incertitudes et sources d'erreurs dans les données.

De plus, une des particularités du système hydrographique de l'île de la Réunion est la présence de rivières non pérennes, c'est-à-dire qui ne sont pas toujours en eau. Pour nos bassins versants, c'est le cas de certaines ravines, par exemple les bassins R0042033 et R0045056 qui sont au Sud-Ouest de l'île sur la Ravine Blanche. Les performances sont respectivement de 0.89 et 0.70 en calage et de 0.63 et 0.17 en contrôle.

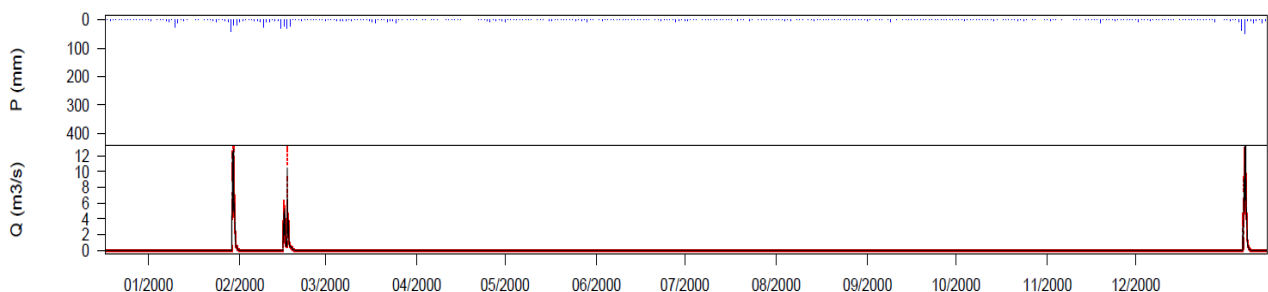


Figure 26 : Hydrogramme de la Ravine Blanche (station R0042033), sur l'année 2000. (Réalisation personnelle)

Le modèle n'est pas capable de reproduire des débits intermittents comme ceux des ravines. De plus, si l'on se projette vers une utilisation du modèle en prévision, les débits observés seront utilisés en assimilation. Des débits nuls poseront alors des problèmes. Il sera probablement difficile d'implanter un modèle de prévision des crues sur des bassins de ce type.

4.3 L'influence des événements hydrologiques

Les périodes de calage conditionnent le jeu de paramètres Xi du modèle pour les périodes de contrôle. Ainsi le jeu de paramètres est adapté à bien représenter le contenu de la période de calage. Si les deux périodes de calage et contrôle ne se ressemblent pas hydrologiquement, alors le jeu de paramètres de calage ne sera pas adapté à la période de contrôle.

Le cas de figure où un événement cyclonique très important influence le calage ou le contrôle est présent sur la rivière des Marsouins au Pont Pompidou (bassin 40120101).

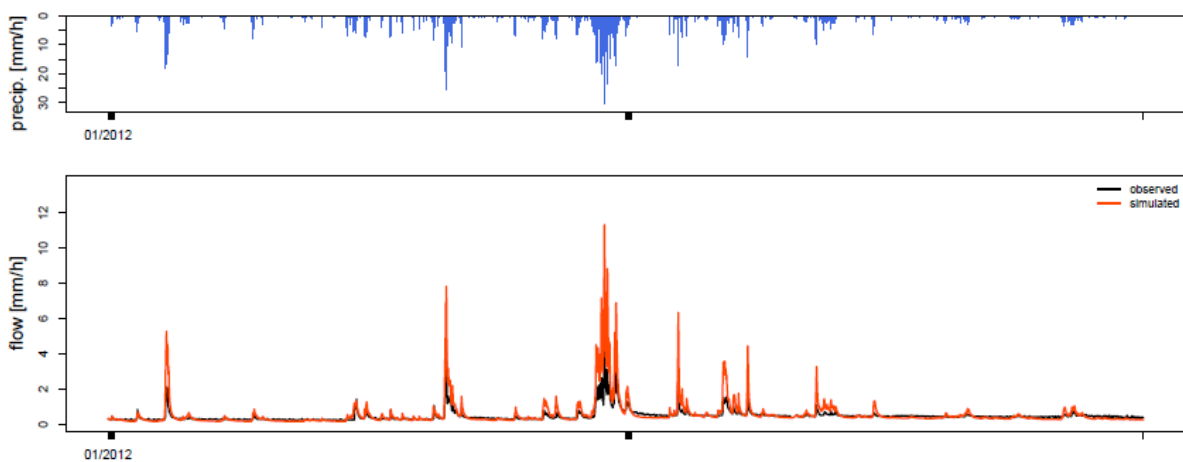


Figure 27 : Hyétogramme et hydrogramme observé et simulé de la rivière des Marsouins au Pont Pompidou (bassin 40120101), lors du calage, entre janvier et juin 2012. (Réalisation personnelle)

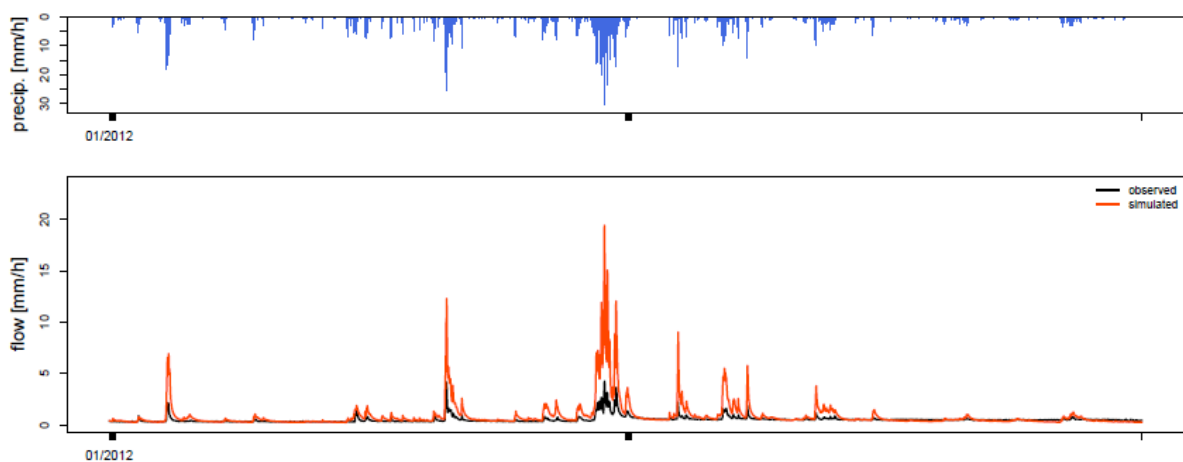


Figure 28 : Hyétogramme et hydrogramme observé et simulé de la rivière des Marsouins au Pont Pompidou (bassin 40120101), lors du contrôle, entre janvier et juin 2012. (Réalisation personnelle)

Les figures ci-dessus représentent les débits observés (en noir) et simulés (en rouge) entre janvier et juin 2012. La **Figure 26** correspond à la simulation en calage, c'est-à-dire avec le jeu de paramètres correspondant à la période à l'étude. Tandis que la **Figure 27** représente la simulation en contrôle, c'est-à-dire avec le jeu de paramètres de l'autre période que celle à l'étude.

On observe une grande différence entre les débits simulés selon le calage ou le contrôle (selon le jeu de paramètres utilisé) : pour la crue de fin mars 2012, les pics simulés en calage et en contrôle sont respectivement de l'ordre de 10 mm/h et 18 mm/h, tandis que le pic de crue observé est d'environ 4 mm/h. En contrôle les débits sont beaucoup plus surestimés qu'en calage. Le jeu de paramètres Xi du modèle utilisé lors du contrôle n'est pas adapté à modéliser ce type de précipitations.

Nous avons fait l'essai de retirer cet événement et de réaliser de nouveau le contrôle sur cette période. Le critère d'évaluation KGE en contrôle passe alors de 0,2 à 0,42, ce qui indique un fonctionnement bien meilleur du modèle sans l'évènement. Ceci laisse à penser qu'une approche à l'aide de paramètres multiples pourrait être une solution efficace pour contourner les problèmes de l'hétérogénéité des événements hydrologiques. On peut par exemple envisager de faire une distinction des paramètres avec la saison sèche ou humide.

Conclusion

Cette étude, réalisée pendant trois mois et demi au sein d'IRSTEA, avait pour objectif de tester les possibilités de mise en place d'un modèle de prévision des crues pour une utilisation opérationnelle par la CVH de la Réunion. Avant de regarder si un modèle était capable de prévoir un débit pour une échéance future donnée, il nous a paru essentiel d'analyser les capacités du modèle hydrologique GR4H à reproduire le comportement hydrologique des bassins versants réunionnais. Le modèle hydrologique est conditionné par la qualité des données d'entrées utilisées. Un travail préliminaire à la modélisation hydrologique consiste à apporter un regard critique sur les données d'entrée.

Une première étape d'analyse critique des données et de diagnostic des bilans en eau des bassins versants a soulevé de possibles anomalies : ratio précipitation/débit disproportionné, lacunes, décrochements dans les débits, manque de données pluviométriques avant 1993...

Des tests en calage-contrôle ont été réalisés et les simulations avec GR4H montrent d'assez bons résultats en phase de calage : le modèle arrive à trouver un jeu de paramètres permettant de retranscrire la chronique de débit correctement. Les performances restent bonnes en contrôle sur environ un quart des bassins versants : ceci tend à dire que l'identification des paramètres du modèle et leur transférabilité sur une période inconnue est bien réalisée, et donc que la mise en place d'un modèle de prévision serait possible.

Cependant, les performances sur les périodes de contrôle sont dégradées sur un certain nombre de bassins versants. Les investigations pour identifier les problèmes de modélisation ont mis en évidence plusieurs causes possibles. La baisse de performances n'a cependant pas pu être reliée de manière univoque à des caractéristiques physio-climatiques des bassins-versants (taille des bassins, cumuls de précipitation par exemple), ni à des problèmes de sur ou sous-estimation des précipitations identifiés grâce aux bilans hydrologiques. La présence d'incohérences entre pluie et débit (crues observées sans précipitation ou forts événements pluvieux qui ne génèrent aucune crue) tendent à indiquer que l'amélioration de la connaissance spatiale de la pluie est un point crucial pour la modélisation hydrologique. La combinaison d'information des pluviomètres et d'information radar permettrait probablement d'affiner l'estimation des précipitations et donc la modélisation. De même, la correction des biais dans l'estimation des pluies moyennes pourrait apporter des améliorations. Cette amélioration de la qualité entraînerait une plus grande confiance envers les données, données qui pourraient être assimilées afin d'améliorer les prévisions à chaque pas de temps. Un modèle de prévision qui permet l'assimilation des données comme le modèle GRP (A.8 Fonctionnement du modèle GRP) pourra par la suite être utilisé.

Ce travail a conduit à la production d'un tableau récapitulatif (Annexe A.7) qui identifie l'ensemble des résultats et problèmes rencontrés pour chacun des bassins versants. Ce tableau pourra être utilisé comme référentiel pour d'autres études à venir.

Bibliographie

- Andréassian, V., Perrin, C., 2012. On the ambiguous interpretation of the Turc-Budyko nondimensional graph. *Water Resour. Res.* 48. doi:10.1029/2012WR012532
- Berthet, L., 2010. Préviation des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. AgroParisTech.
- BRGM, 2014. SPICy [WWW Document]. URL <http://spicy.brgm.fr/fr> (accessed 8.1.17).
- BRL ingénierie, M.C., 2016. Projet SPICY - Modélisation hydrologique pour la préviation des crues. BRL ingénierie.
- Collyns, D., 2017. How can Peru prepare to withstand more devastating floods and landslides? *The Guardian*.
- Comité de Bassin Réunion, 2013. État des lieux 2013 du district hydrographique de la Réunion.
- Coron, L., Perrin, C., Michel, C., 2017a. airGR: Suite of GR Hydrological Models for recipitation-Runoff Modelling. R package version 1.0.9.13. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGR/>.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017b. The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R Package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166–171. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Ficchi, A., 2017. An adaptive hydrological model for multiple time-steps: Diagnostics and improvements based on fluxes consistency.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models Vérification, en conditions réelles, des modèles de simulation hydrologique [WWW Document]. URL <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626668609491024> (accessed 8.10.17).
- La Réunion - IEDOM [WWW Document], n.d. URL <http://www.iedom.fr/la-reunion/> (accessed 8.7.17).
- Le Moine, N., 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?, PhD thesis (french), UPMC, Paris, France.
- Ly, S., Charles, C., Degré, A., 2013. Méthodes de spatialisation de données pluviométriques dédiées à l'hydrologie opérationnelle et à la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 17, 392–406.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants, PhD thesis (in French), ENGREF - Cemagref (Antony), Paris, France.
- METEO FRANCE, 2016. Présentation de la saison cyclonique 2016-2017 à La Réunion [WWW Document]. URL http://www.reunion.gouv.fr/IMG/pdf/press_2016-11-16_saison_cyclonique_-_dossier_de_presse.pdf (accessed 7.31.17).
- METEO FRANCE, n.d. Records mondiaux - Pluies extrêmes à La Réunion [WWW Document]. URL <http://pluiesextremes.meteo.fr/lareunion/Records-mondiaux.html> (accessed 7.31.17a).
- METEO FRANCE, n.d. Évènements mémorables - Pluies extrêmes à La Réunion [WWW Document]. URL <http://pluiesextremes.meteo.fr/lareunion/-Evenements-memorables-.html> (accessed 7.31.17b).

- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Nehlig, P., Bucelle, M., 2005. *Connaissance géologique de la Réunion - Livret de l'enseignant.*
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2007. *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR).* Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Antony.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279 275-289.
- Perrin, F., Sauzey, P., Ménoret, B., Roche, P.-A., 2017. *Rapport inondations mai-juin 2016.*
- Rapport final projet PRECYP, 2014.
- SANDRE, n.d. Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau [WWW Document]. URL <http://www.sandre.eaufrance.fr/> (accessed 8.3.17).
- Shepard, D., 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data 517–524.
- Tangara, M., 2005. *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global.* Ecole pratique des hautes études de Paris Ecole doctorale : Sciences de la Vie et de la Terre, Laboratoire : Hydrologie et Environnement.
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation Averages for Large Areas. *Mon. Weather Rev.* 39, 1082–1084.

Annexes

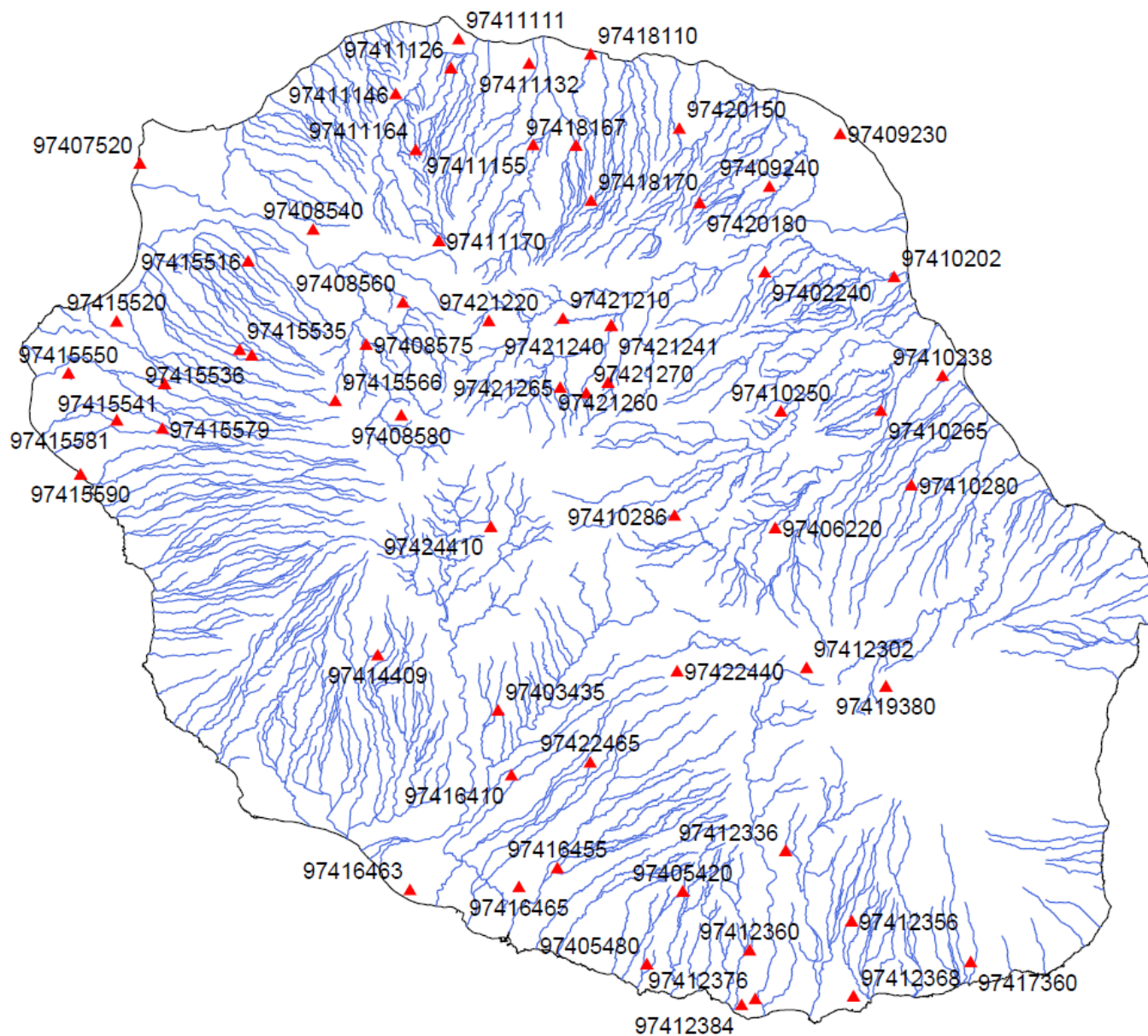
- A.1 Synthèses des stations pluviométriques et de leurs données
- A.2 Positionnement des stations pluviométriques
- A.3 Synthèses des stations hydrométriques et de leurs données
- A.4 Positionnement de chacun des bassins versants avec leur numéro
- A.5 Surface des bassins versant à l'étude
- A.6 Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant
- A.6 Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant
- A.7 Diagnostic de modélisation
- A.8 Fonctionnement du modèle GRP
- A.9 Tests pour une correction des précipitations

A.1 Synthèses des stations pluviométriques et de leurs données

Longitude	Latitude	Id Station	Nom	Nb Valeurs	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée	Pays	Colonne1	Gestionnaire
55,62266541	-21,00499916	97402240_C1h	BELLEVUE BRAS-PANON (C1h)	204945	29/09/1991	31/12/2016	1,77	24,81	Réunion (974)	Bras Panon	Météo France
55,4746666	-21,22833252	97403435_C1h	BRAS LONG (C1h)	6675	23/05/2013	26/02/2014	0,373	0,76	Réunion (974)		Météo France
55,57483292	-21,3220005	97405420_C1h	PITON-BLOC - CIRAD (C1h)	124487	29/03/2002	31/12/2016	2,757	14,35	Réunion (974)		Météo France
55,55483246	-21,3591671	97405480_C1h	PETITE-ILE - CIRAD (C1h)	144052	18/03/2000	31/12/2016	0,563	16,69	Réunion (974)	Petite Ile	Météo France
55,62716675	-21,13616753	97406220_C1h	PLAINE DES PALMISTES (C1h)	217363	29/09/1991	31/12/2016	0,514	25,13	Réunion (974)	La Plaine des Palmistes	Météo France
55,2820015	-20,94616699	97407520_C1h	LE PORT (C1h)	211268	01/10/1991	31/12/2016	0,069	25,23	Réunion (974)	Le Port	Météo France
55,3761673	-20,9810009	97408540_C1h	Dos d'âne (C1h)	96	24/02/2007	28/02/2007	0	0,01	Réunion (974)	La Possession	Météo France
55,42483139	-21,01883316	97408560_C1h	AURERE (C1h)	103593	25/08/2004	31/12/2016	0,457	12,29	Réunion (974)	La Possession	Météo France
55,40449905	-21,04016685	97408575_C1h	Cayenne SA (C1h)	32980	01/09/2004	25/08/2008	0	3,98	Réunion (974)	La Possession	Météo France
55,42333221	-21,07666779	97408580_C1h	LA_NOUVELLE (C1h)	141937	28/09/1991	31/12/2016	0,728	25,08	Réunion (974)	Possession	Météo France
55,66450119	-20,93449974	97409230_C1h	LE COLOSSE (C1h)	105409	24/08/2004	31/12/2016	1,317	12,19	Réunion (974)	Saint-André	Météo France
55,62566757	-20,96116638	97409240_C1h	Menciol (C1h)	64404	08/03/2001	25/08/2008	0	7,47	Réunion (974)	Saint-André	Météo France
55,69333267	-21,00799942	97410202_C1h	Beauvallon (C1h)	60584	25/07/2001	25/08/2008	0	7,09	Réunion (974)	Saint-Benoit	Météo France
55,71933365	-21,05883217	97410238_C1h	SAINT-BENOIT (C1h)	214985	29/09/1991	31/12/2016	0,387	25,16	Réunion (974)	Saint-Benoît	Météo France
55,63083267	-21,07633209	97410250_C1h	TAKAMAKA - PK12 (C1h)	63652	24/02/2007	31/12/2016	26,281	7,26	Réunion (974)	Saint-Benoît	Météo France
55,6855011	-21,07649994	97410265_C1h	CHEMIN_DE_CEINTURE (C1h)	102111	24/07/2003	31/12/2016	0,087	13,43	Réunion (974)	Saint-Benoît	Météo France
55,70183182	-21,11483383	97410280_C1h	Cambourg les hauts (C1h)	82713	11/08/1983	02/05/2007	0	23,72	Réunion (974)	Saint-Benoit	Météo France
55,57216644	-21,1293335	97410286_C1h	Bebour (C1h)	60123	14/11/1996	18/07/2004	0	7,67	Réunion (974)	Saint-Benoit	Météo France
55,45666885	-20,88416672	97411111_C1h	Saint -Denis collège (C1h)	93140	04/12/1997	25/08/2008	0	10,72	Réunion (974)	Saint-Denis	Météo France
55,45233154	-20,89883232	97411126_C1h	Saint-Denis la providence (C1h)	82956	01/01/1999	25/08/2008	0	9,65	Réunion (974)	Saint-Denis	Météo France
55,49499893	-20,89699936	97411132_C1h	Saint-Denis le Chaudron (C1h)	118	23/02/2007	28/02/2007	0	0,01	Réunion (974)	Saint-Denis	Météo France
55,42200089	-20,91183281	97411146_C1h	COLORADO (C1h)	120703	11/03/2003	31/12/2016	0,061	13,8	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,4968338	-20,9386673	97411155_C1h	MONTAUBAN (C1h)	63306	29/09/2009	31/12/2016	0,448	7,22	Réunion (974)		Météo France
55,43266678	-20,9406662	97411164_C1h	LE BRULE - VAL FLEURI (C1h)	61480	23/09/2009	31/12/2016	0,227	7,26	Réunion (974)	Saint-Denis	Météo France
55,44483185	-20,9873333	97411170_C1h	PLAINE DES CHICOTS (C1h)	131153	01/01/1994	31/12/2016	1,684	22,61	Réunion (974)	Saint-Denis	Météo France
55,64366531	-21,20800018	97412302_C1h	COMMERSON (C1h)	34508	24/02/2007	31/12/2016	40,439	5,87	Réunion (974)	Saint-Joseph	Météo France
55,6313324	-21,30166626	97412336_C1h	GRAND-COUDE (C1h)	215288	29/09/1991	31/12/2016	0,353	25,17	Réunion (974)	Saint-Joseph	Météo France
55,66716766	-21,33799934	97412356_C1h	LA CRETE - CIRAD (C1h)	118764	14/01/2003	31/12/2016	0,703	13,86	Réunion (974)	Saint-Joseph	Météo France
55,61116791	-21,35250092	97412360_C1h	Les Lianes CIRAD (C1h)	54803	06/05/2002	25/08/2008	0	6,31	Réunion (974)	Saint-Joseph	CIRAD - Météo France
55,66783142	-21,37649918	97412368_C1h	Vincendo CIRAD (C1h)	55123	19/03/2002	25/08/2008	0	6,44	Réunion (974)	Saint-Joseph	CIRAD - Météo France
55,61399841	-21,37750053	97412376_C1h	St-Joseph - Gendarmerie (C1h)	24993	20/02/1997	06/07/2000	0	3,37	Réunion (974)	Saint-Joseph	Météo France
55,60649872	-21,38050079	97412384_C1h	Saint-Joseph CIRAD (C1h)	84655	16/11/1997	22/08/2008	0	10,77	Réunion (974)	Saint-Joseph	CIRAD - Météo France

55,40916824	-21,19949913	97414409_C1h	PLAINE DES MAKES (C1h)	103731	30/12/2004	31/12/2016	0,724	11,92	Réunion (974)	Saint-Paul	Météo France
55,34049988	-20,9968338	97415516_C1h	BOIS DE NEFLES ST-PAUL CIRAD (C1h)	124459	24/06/2002	31/12/2016	0,85	14,4	Réunion (974)	Saint-Paul	CIRAD - Météo France
55,26832962	-21,02700043	97415520_C1h	Plateau Caillou CIRAD (C1h)	11463	19/04/2007	25/08/2008	0	1,35	Réunion (974)	Saint-Paul	CIRAD - Météo France
55,33533096	-21,04216957	97415535_C1h	Petite France 1 (C1h)	55574	29/09/1991	30/03/1999	0	7,5	Réunion (974)	Saint-Paul	Météo France
55,34199905	-21,04500008	97415536_C1h	PETITE- FRANCE 2 (C1h)	142097	22/09/1999	31/12/2016	3,22	16,72	Réunion (974)		Météo France
55,29416656	-21,05916786	97415541_C1h	TAN-ROUGE - CIRAD (C1h)	119434	10/03/2002	31/12/2016	0,468	14,74	Réunion (974)		Météo France
55,2416687	-21,05333328	97415550_C1h	L'Ermitage CIRAD (C1h)	54593	11/05/2002	25/08/2008	0	6,29	Réunion (974)	Saint-Paul	CIRAD - Météo France
55,38733292	-21,0688324	97415566_C1h	PITON-MAIDO (C1h)	156028	18/11/1998	31/12/2016	0,157	18,09	Réunion (974)	Saint-Paul	Météo France
55,29266739	-21,08216667	97415579_C1h	Vue-Belle CIRAD (C1h)	42265	18/09/2003	25/08/2008	0	4,94	Réunion (974)	Saint-Paul	CIRAD - Météo France
55,26783371	-21,07766724	97415581_C1h	La saline les Hauts (C1h)	71263	28/03/2000	25/08/2008	0	8,41	Réunion (974)	Saint-Paul	Météo France
55,24766541	-21,10516739	97415590_C1h	POINTE DES TROIS-BASSINS (C1h)	210639	08/10/1991	31/12/2016	0,158	25,19	Réunion (974)		Météo France
55,48166656	-21,26166725	97416410_C1h	Ravine des Cabris (C1h)	98862	01/04/1997	25/08/2008	0	11,4	Réunion (974)		
55,5063324	-21,30949974	97416455_C1h	Bassin Martin (C1h)	67297	02/09/1998	01/08/2006	0	7,91	Réunion (974)		
55,42549896	-21,31999969	97416463_C1h	PIERREFONDS-AEROPORT (C1h)	149924	08/10/1999	31/12/2016	0,152	17,21	Réunion (974)		Météo France
55,48516846	-21,31900024	97416465_C1h	Ligne Paradis (C1h)	99056	01/04/1997	25/08/2008	0	11,4	Réunion (974)		
55,73216629	-21,35950089	97417360_C1h	LE BARIL (C1h)	170675	29/09/1991	31/12/2016	0,252	25,19	Réunion (974)	Saint-Philippe	Météo France
55,52866745	-20,89249992	97418110_C1h	GILLOT-AEROPORT (C1h)	248362	01/01/1971	31/12/2016	0	46	Réunion (974)	Sainte-Marie	Météo France
55,5201683	-20,93916702	97418167_C1h	L'Espérance (C1h)	28934	25/06/2003	18/01/2007	0	3,57	Réunion (974)	Sainte-Marie	Météo France
55,52816772	-20,96750069	97418170_C1h	PLAINE DES FOUGERES (C1h)	63739	26/01/2009	31/12/2016	0,524	7,89	Réunion (974)	Sainte-Marie	Météo France
55,68700027	-21,21783257	97419380_C1h	BELLECOMBE (C1h)	153490	03/07/1998	31/12/2016	0,461	18,41	Réunion (974)	Sainte-Rose	Météo France
55,57666779	-20,93099976	97420150_C1h	BAGATELLE (C1h)	132522	08/08/2001	31/12/2016	0,442	15,33	Réunion (974)	Sainte-Suzanne	Météo France
55,58750153	-20,96916771	97420180_C1h	BRAS-PISTOLET (C1h)	108679	11/12/2002	31/12/2016	2,324	13,73	Réunion (974)	Saint-André	Météo France
55,51216888	-21,02783394	97421210_C1h	Mare à vieille place (C1h)	137059	29/09/1991	25/08/2008	0	16,91	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,47166824	-21,02866745	97421220_C1h	GRAND-ILET - BRGM (C1h)	110400	09/02/2004	31/12/2016	1,424	12,71	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,53850174	-21,03166771	97421240_C1h	SALAZIE-VILLAGE (C1h)	177102	29/01/1996	31/12/2016	0,079	20,91	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,53649902	-21,06083298	97421260_C1h	BELOUVE (C1h)	33124	24/02/2007	31/12/2016	61,673	3,78	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,51033401	-21,06316757	97421265_C1h	ILET A VIDOT - BRGM (C1h)	104702	20/02/2004	31/12/2016	2,47	12,54	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,5245018	-21,06616783	97421270_C1h	Hell-Bourg (C1h)	96	24/02/2007	28/02/2007	0	0,01	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,57283401	-21,20916748	97422440_C1h	PLAINE DES CAFRES (C1h)	216559	29/09/1991	31/12/2016	0,796	25,06	Réunion (974)	Tampon	Météo France
55,52483368	-21,25550079	97422465_C1h	LE TAMPON - CIRAD (C1h)	126083	09/07/2002	31/12/2016	0,202	14,45	Réunion (974)	Tampon	Météo France
55,53850174	-21,03166962	97421241_C1h	Salazie P2 (C1h)	92582	23/11/1997	25/08/2008	0	10,75	Réunion (974)	Salazie	Météo France
55,62266541	-21,00499916	97402240_C1h	BELLEVUE BRAS-PANON (C1h)	204945	29/09/1991	31/12/2016	1,77	24,81	Réunion (974)	Bras Panon	Météo France

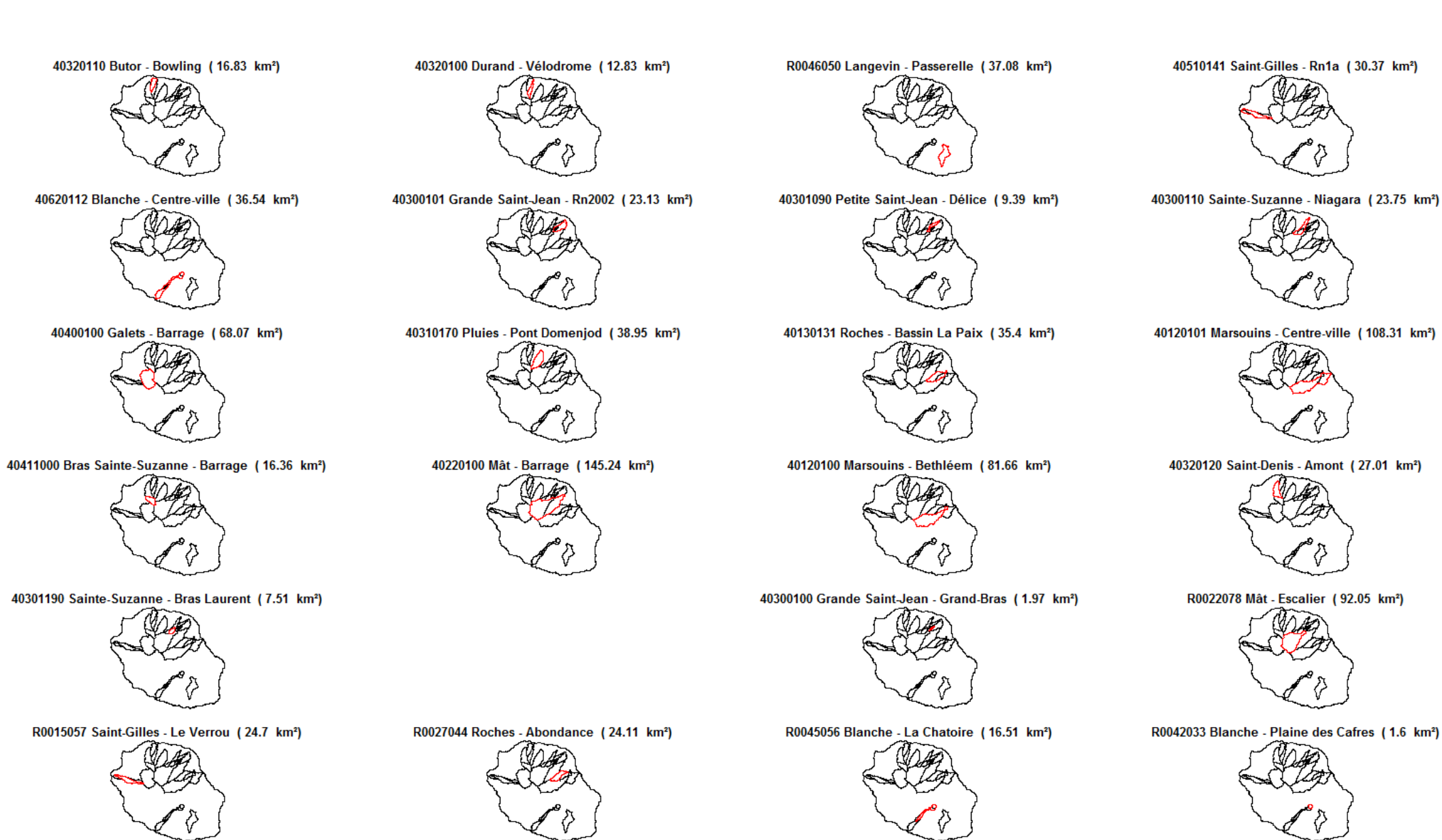
A.2 Positionnement des stations pluviométriques



A.3 Synthèses des stations hydrométriques et de leurs données

Id Station	Nom	Code CVH	Nb Valeurs	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée	Pays	Surface BV (km²)	Rivière	Gestionnaire	Code_fichier
14015_Q_OE	Q_P_St-Denis_Amont - Captage AEP - CT OLE	S20	761082	09/11/1999	30/04/2014	0	14,47	Réunion (974)	26,75	Rivière Saint-Denis	OLE-DEAL	40320120
40320120_Q	Q_P_St-Denis_Amont - Captage AEP - CT CVH	S20	356979	01/01/2013	28/02/2017	8,332	3,81	Réunion (974)	26,75	Rivière Saint-Denis	OLE-DEAL	40320120
40320110_Q	Q_R_RavButor - Ravine Butor (Bowling) - CVH	S01	446223	01/01/2010	28/02/2017	29,79	5,03	Réunion (974)	21,6	Ravine Butor	DEAL974	40320110
40310170_Q	Q_R_Riv des Pluies - Pont Domenjob - CT CVH	S10	556601	01/07/2008	28/02/2017	22,821	6,69	Réunion (974)	41,26	Rivière des Puies	DEAL974	40310170
27054_Q_OE	Q_P_RivMarsouins - Bethléem - CT OLE	S24	810527	10/08/1994	31/05/2014	1,64	19,48	Réunion (974)	81,85	Rivière des Marsouins	OLE-DEAL	40120100
40120100_Q	Q_P_RivMarsouins - Bethléem - CT CVH	S24	1054144	10/08/1994	30/11/2016	2,40	21,77	Réunion (974)	81,85	Rivière des Marsouins	DEAL974	40120100
40120101_Q	Q_R_RivMarsouins - Pont Pompidou - CT CVH	S03	672978	01/02/2006	30/09/2016	19,05	8,63	Réunion (974)	108,57	Rivière des Marsouins	DEAL974	40120101
46050_Q_OE	Q_P_RivLangevin- Passerelle - CT OLE	S29	1194043	23/02/1987	16/03/2017	0	30,06	Réunion (974)	35	Rivière Langevin	OLE-DEAL	R0046050
15057_Q_OE	Ravine Saint-Gilles - Le Verrou - Débits	S31	1520573	25/03/2005	17/10/2016	0	11,56	Réunion (974)	24,7	Ravine Saint-Gilles	OLE	R0015057
40510141_Q	Ravine Saint-Gilles - Pont RN1 - Débits	S11	390293	01/08/2006	28/02/2017	50,218	5,27	Réunion (974)	29,68	Ravine Saint-Gilles	DEAL	40510141
40320100_Q	Q_Rav Patate_Durand (Vélodrome) - CT CVH	S04	753205	01/02/2007	28/02/2017	10,976	8,97	Réunion (974)	12,8	Ravine Patate à Durand	DEAL974	40320100
21062_Q_OE	Q_P_RivSteSuzanne -Bras Laurent-CT OLE	S22	1037716	22/06/2000	30/04/2014	0	13,85	Réunion (974)	7,33	Rivière Ste Suzanne	OLE-DEAL	40301190
40301190_Q	Q_P_RivSteSuzanne -Bras Laurent-CT CVH	S22	383773	01/01/2013	21/02/2017	3,468	4	Réunion (974)	7,33	Rivière Ste Suzanne	OLE-DEAL	40301190
40300110_Q	Q_P_RivSteSuzanne -Niagara - CT CVH	S17	554678	01/06/2010	28/02/2017	4,559	6,44	Réunion (974)	23,21	Rivière Ste Suzanne	OLE-DEAL	40300110
22011_Q_OE	Q_R_GdRivStJean - Grand Bras- CT OE	S25	495443	22/12/2004	30/04/2014	4,686	8,91	Réunion (974)	1,93	Grande Rivière Saint-Jean	OLE-DEAL	40300100
40300100_Q	Q_R_GdRivStJean - Grand Bras- CT CVH	S25	291445	01/08/2013	30/09/2016	3,899	3,04	Réunion (974)	1,93	Grande Rivière Saint-Jean	OLE-DEAL	40300100
40301090_Q	Q_P_Pte_Riv_StJean - Cascade Délices - CT CVH	S18	514193	19/02/2010	30/09/2016	10,439	5,92	Réunion (974)	9,4	Petite Rivière Saint-Jean	OLE-DEAL	40301090
40300101_Q	Q_R_GdRivStJean - Pont ex RN2- CT CVH	S15	445918	01/01/2010	30/09/2016	26,183	4,98	Réunion (974)	18,14	Grande Rivière Saint-Jean	DEAL	40300101
22056_Q_OE	Q_P_RivduMat - Barrage - CT OLE	S14	329502	19/07/1999	10/12/2008	0	9,4	Réunion (974)	145,13	Rivière du Mât	OLE	40220100
40220100_Q	Q_R_RivduMat - Barrage - CT CVH	S14	209479	01/06/2010	28/02/2017	68,475	2,13	Réunion (974)	145,13	Rivière du Mât	DEAL	40220100
22078_Q_OE	Q_P_Riv du Mât- (Pont Escalier - CT OLE	S23	1067321	18/02/2000	07/03/2017	0	17,05	Réunion (974)	92,11	Rivière du Mât	OLE-DEAL	R0022078
27044_Q_OE	Q_P_RivRoches - Abondance - CT OLE	S33	1841194	01/01/1991	15/03/2017	0,887	25,97	Réunion (974)	24,21	Rivière des Roches	OLE	R0027044
40130131_Q	Q_P_RivRoches_PAIX - Bassin La Paix- CT CVH	S19	495709	01/11/2011	28/02/2017	1,037	5,27	Réunion (974)	35,48	Rivière des Roches	DEAL	40130131
40620112_Q	Ravine Blanche - ZII Abattoir - CT CVH	S12	328569	01/11/2007	28/02/2017	55,676	4,13	Réunion (974)	35,27	Ravine Blanche		40620112
42033_Q_OE	Ravine Blanche - Plaine des Cafres - CT OE	S30	3574753	07/01/1981	15/03/2008	0	27,18	Réunion (974)	3,54	Ravine Blanche		R0042033
45056_Q_OE	Ravine Blanche - Chatoire - CT OE	S28	774720	09/03/1999	01/03/2007	0	7,98	Réunion (974)	12,26	Ravine Blanche		R0045056
40400100_Q	Q_R_RivGalets-Riv des Galets - CT CVH	S07	644657	01/02/2006	28/02/2017	27,633	8,01	Réunion (974)	68	Rivière des Galets	DEAL974	40400100
40411000_Q	Q_P_BrasSteSuzanne - Captage - CT CVH	S09	601341	01/02/2006	28/02/2017	30,189	7,73	Réunion (974)	16,3	Bras de Sainte Suzanne	DEAL974	40411000

A.4 Positionnement de chacun des bassins versants avec leur numéro



A.5 Surface des bassins versant à l'étude

Code_fichier	Rivière	Surface BV (km²)
40320120	Rivière Saint-Denis	26,75
40320110	Ravine Butor	21,6
40310170	Rivière des Puies	41,26
40120100	Rivière des Marsouins	81,85
40120101	Rivière des Marsouins	108,57
R0046050	Rivière Langevin	35
R0015057	Ravine Saint-Gilles	24,7
40510141	Ravine Saint-Gilles	29,68
40320100	Ravine Patate à Durand	12,8
40301190	Rivière Ste Suzanne	7,33
40300110	Rivière Ste Suzanne	23,21
40300100	Grande Rivière Saint-Jean	1,93
40301090	Petite Rivière Saint-Jean	9,4
40300101	Grande Rivière Saint-Jean	18,14
40220100	Rivière du Mât	145,13
R0022078	Rivière du Mât	92,11
R0027044	Rivière des Roches	24,21
40130131	Rivière des Roches	35,48
40620112	Ravine Blanche	35,27
R0042033	Ravine Blanche	3,54
R0045056	Ravine Blanche	12,26
40400100	Rivière des Galets	68
40411000	Bras de Sainte Suzanne	16,3

A.6 Définition des périodes P1 et P2 pour chaque bassin versant

Code_bassin	Début de P1	Fin de P1 et début de P2	Fin de P2
40320110	01/01/2010	01/02/2012	01/03/2014
40320100	01/01/2008	01/06/2012	31/12/2016
R0046050	01/01/1990	01/01/2004	31/12/2016
40300101	01/01/2013	01/01/2015	31/12/2016
40301090	01/07/2011	01/03/2014	31/12/2016
40300110	01/04/2011	01/02/2014	31/12/2016
40400100	01/01/2011	01/01/2014	31/12/2016
40130131	01/11/2011	01/07/2014	31/12/2016
40120101	01/01/2008	01/07/2012	31/12/2016
40411000	01/01/2011	01/07/2014	31/12/2016
40220100	01/08/1999	01/02/2003	01/09/2006
40120100	01/09/1994	01/05/2005	31/12/2016
40320120	01/12/1999	01/06/2006	31/12/2016
40301190	01/07/2000	01/04/2009	31/12/2016
40300100	01/01/2005	01/01/2011	31/12/2016
R0022078	20/02/2000	01/06/2009	31/12/2016
R0015057	01/04/2005	01/01/2011	15/10/2016
R0027044	01/01/1991	01/01/2004	31/12/2016
R0045056	01/01/2001	01/02/2004	28/02/2007
R0042033	01/01/2000	01/02/2004	10/03/2008

A.7 Diagnostic de modélisation

Code fichier	Rivière	Surface BV (km ²)	Diagnostic de modélisation	Pistes explicatives
40320120	Rivière Saint-Denis	26,75	KGE_cal= 0,79 KGE_con= 0,52	
40320110	Ravine Butor	21,6	KGE_cal= 0,79 KGE_con= 0,46	
40310170	Rivière des Puies	41,26		
40120100	Rivière des Marsouins	81,85	KGE_cal= 0,92 KGE_con= 0,73	
40120101	Rivière des Marsouins	108,57	KGE_cal= 0,9 KGE_con= 0,38 Qsim>Qobs	Un événement porte la plus grande part de l'erreur du modèle, ce qui explique les différences de performances entre le contrôle et le calage Une piste est d'enlever l'évènement de 2012 et de voir l'évolution des performances
R0046050	Rivière Langevin	35	KGE_cal= 0,79 KGE_con= 0,34	Pas de pluie en 1992, la spatialisation des pluies a été faite sur un seul pluviographe qui est lui-même défaillant cette année.
R0015057	Ravine Saint-Gilles	24,7	KGE_cal= 0,86 KGE_con= 0,65 fonctionnement en ravine	Forte variation des paramètres X1 et X2 entre le calage sur P1 et P2 Problème en janvier 2013, pas de débits simulés, cela vient sûrement d'un pb de pluies
40510141	Ravine Saint-Gilles	29,68		
40320100	Ravine Patate à Durand	12,8	KGE_cal= 0,84 KGE_con= 0,63 fonctionnement en ravine	Forte variation du paramètre X1
40301190	Rivière Ste Suzanne	7,33	KGE_cal= 0,88 KGE_con= 0,75	
40300110	Rivière Ste Suzanne	23,21	KGE_cal= 0,87 KGE_con= 0,86	Forte variation du paramètre X1 On dirait qu'il y a un seuil minimum, cela est dû au X2 (apport d'eau à chaque pas de temps modèle pas très bon en bas débit du coup
40300100	Grande Rivière Saint-Jean	1,93	KGE_cal= 0,93 KGE_con= 0,65	
40301090	Petite Rivière Saint-Jean	9,4	KGE_cal= 0,80 KGE_con= 0,57	

40300101	Grande Rivière Saint-Jean	18,14	KGE_cal= 0,75 KGE_con= 0,69	
40220100	Rivière du Mât	145,13	KGE_cal= 0,95 KGE_con= 0,93	
R0022078	Rivière du Mât	92,11	KGE_cal= 0,78 KGE_con= 0,46	Forte variation des paramètres X1 et X3
R0027044	Rivière des Roches	24,21	KGE_cal= 0,8 KGE_con= 0,64	
40130131	Rivière des Roches	35,48	KGE_cal= 0,92 KGE_con= 0,87 performances +++	
40620112	Ravine Blanche	35,27		
R0042033	Ravine Blanche	3,54	KGE_cal= 0,89 KGE_con= 0,63 BV intermittent, pas adapté à la modélisation	Forte variation du paramètre X1
R0045056	Ravine Blanche	12,26	KGE_cal= 0,7 KGE_con= 0,17 BV intermittent, pas adapté à la modélisation	Forte variation du paramètre X1
40400100	Rivière des Galets	68	KGE_cal= 0,79 KGE_con= 0,72	
40411000	Bras de Sainte Suzanne	16,3	KGE_cal= 0,91 KGE_con= 0,51	Les débits de 2011 ne sont pas simulés, sûrement car pas de pluie en entrée du modèle Lors du calage, le modèle tord ses paramètres pour réduire cette erreur liée au manque de données de pluie

A.8 Fonctionnement du modèle GRP

Le modèle GRP (Berthet, 2010; Tangara, 2005) est un modèle hydrologique de prévision des crues global et qui fonctionne en continu au pas de temps horaire. C'est un modèle qui permet l'assimilation des données de débits observés en temps réel afin de mettre en adéquation les observations et les simulations.

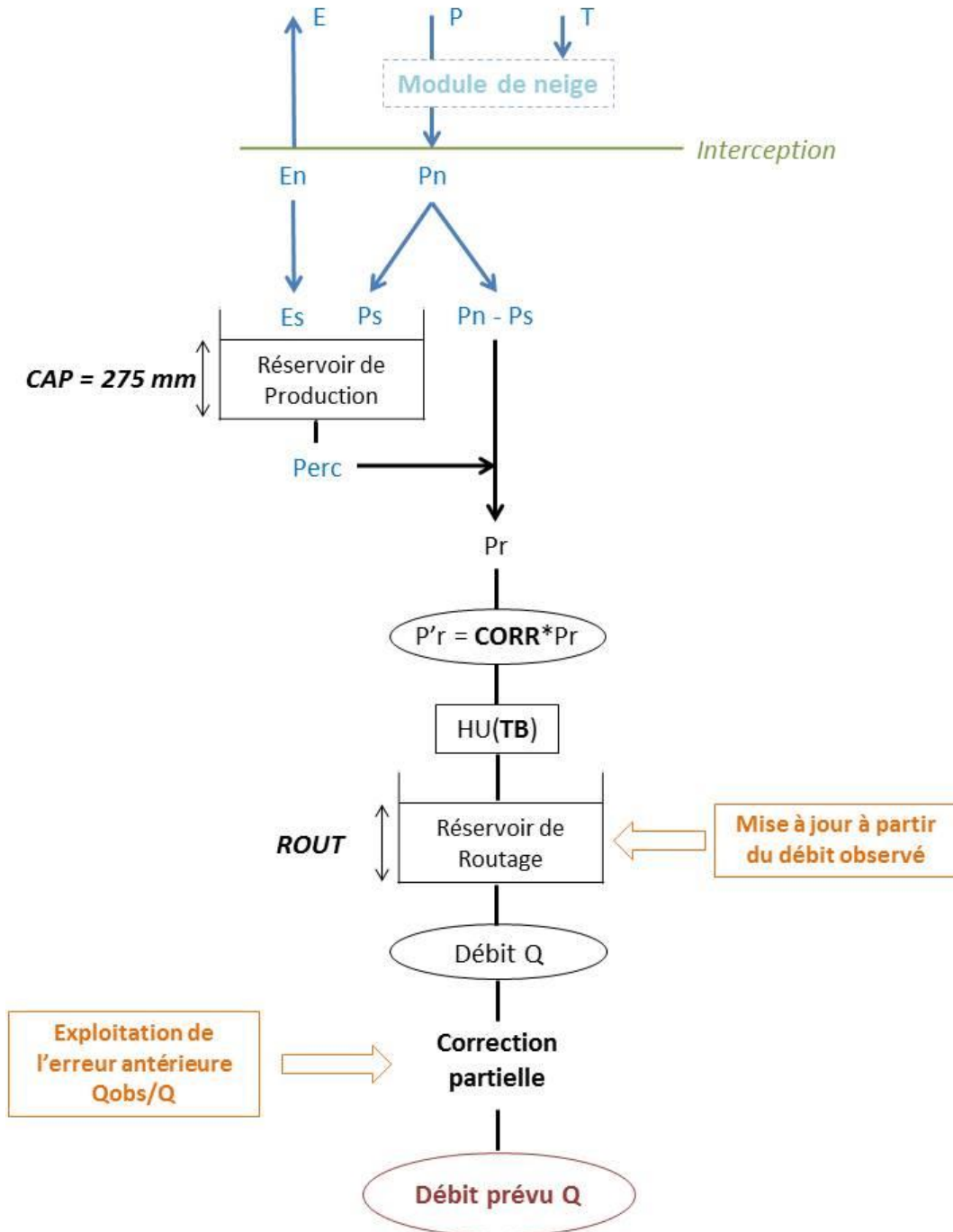


Figure A.8 : Schéma de la structure conceptuelle du modèle GRP. (Source : <https://webgr.irstea.fr/modeles/>)

Les paramètres de calage sont différents de ceux de GR4H. Il y en a trois :

- CORR : corrige la pluie réelle pour ajuster le bilan en eau du bassin.
- TB : correspond au temps de base de l'hydrogramme unitaire qui maintient le décalage temporel entre la pluie et sa transformation en débit. (en heures)
- ROUT : équivaut à la capacité du réservoir de routage, qui lisse les pluies dans le temps. (en millimètres)

A.9 Tests pour une correction des précipitations

Conformément à la méthodologie expliquée en fin de partie : 3.4.2 Les paramètres du modèle.

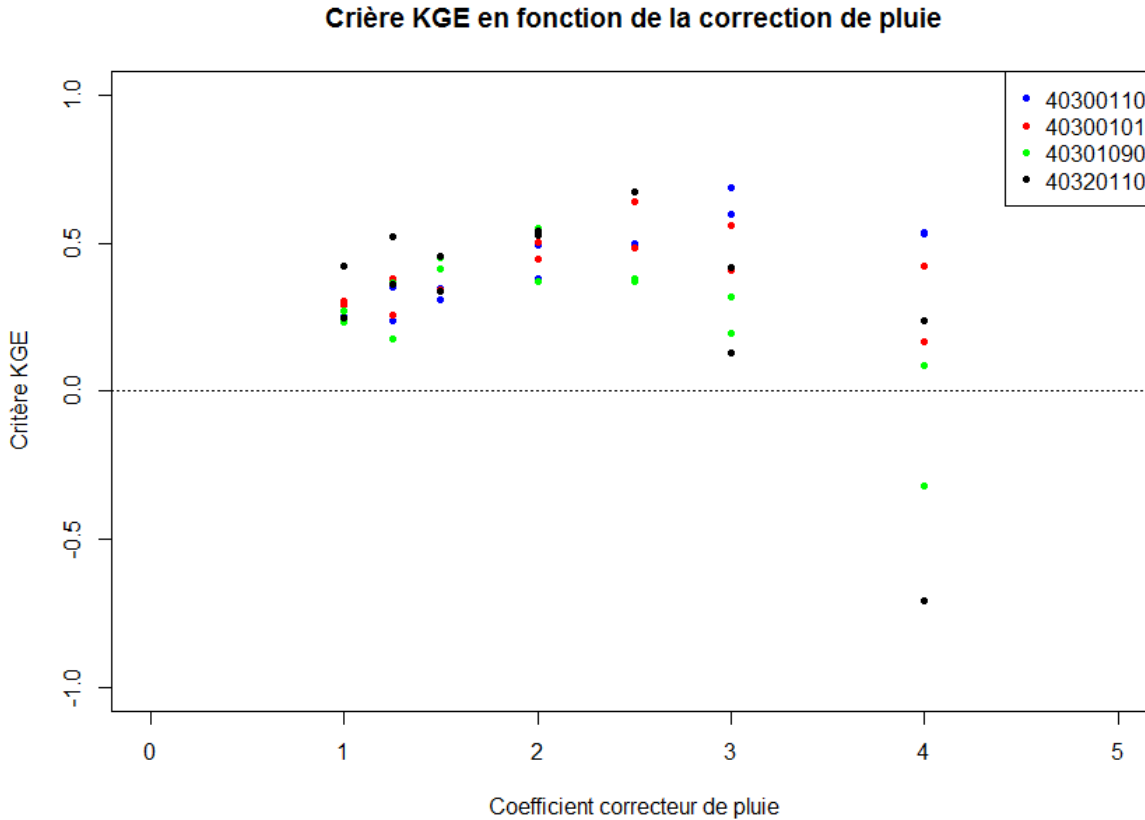


Figure A.9.1 : Superposition des KGE en fonction de la correction de pluie pour les quatre bassins versants.

Sur ce graphique, des résultats assez similaires entre bassins sont observés pour de faibles corrections (inférieure à 2,5). Tandis que lorsque la correction est égale ou supérieure à 3, il n'y a plus aucune similitude des résultats entre les bassins.

Sur les quatre bassins, la correction optimale semblerait se situer entre 2 et 2.5, c'est là que sont situés les meilleurs critères de KGE.

avec une pluie modifiée par 2.5

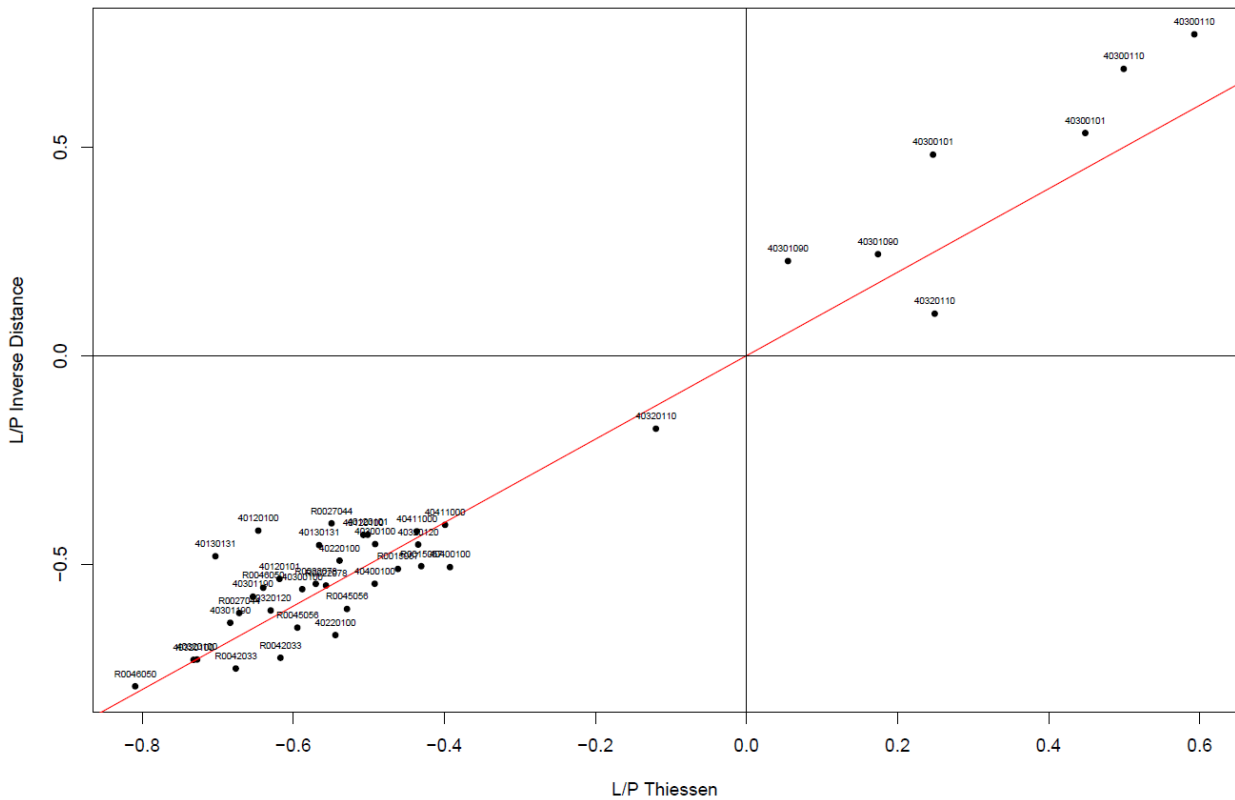


Figure A.9.2 : Graphique représentant les rapports des échanges cumulés sur les précipitations corrigées cumulées en fonction de la méthode de spatialisation des pluies.

La figure A.9.2 est la même que la **Figure 23**, mais elle est réalisée avec les précipitations multipliées par 2.5. On peut voir que les quatre bassins qui avant correction avaient un rapport L/P supérieur à 1, ont des échanges d'eau moindre par rapport aux précipitations.