



HAL
open science

Monographie hydrologique d'Haïti : analyse et prédétermination des pluies et crues fortes à partir de données d'archives et satellitaires

Ralph Bathelemy

► **To cite this version:**

Ralph Bathelemy. Monographie hydrologique d'Haïti : analyse et prédétermination des pluies et crues fortes à partir de données d'archives et satellitaires. Sciences de l'environnement. Université Côte D'Azur; Université d'Etat d'Haïti, 2023. Français. NNT : 2023COAZ4124 . tel-04361205v1

HAL Id: tel-04361205

<https://hal.science/tel-04361205v1>

Submitted on 26 Jan 2024 (v1), last revised 8 Feb 2024 (v2)

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

THÈSE DE DOCTORAT

Monographie hydrologique d'Haïti :
analyse et prédétermination des pluies et crues fortes à partir de
données d'archives et satellitaires

Ralph Bathelemy

GEOAZUR UMR 7329 (France) et URGEO (Haïti)

**Présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en sciences de
l'environnement
d'Université Côte d'Azur
et de l'Université d'Etat d'Haïti
Dirigée par :** Pierre Brigode et Dominique
Boisson
Soutenue le : 14 décembre 2023

Devant le jury, composé de :
Mme Françoise Courboux, Directrice de recherche CNRS,
Université Côte d'Azur (*présidente du jury*)
M. Evens Emmanuel, Professeur,
Université Quisqueya (Haïti) (*rapporteur*)
Mme Marielle Gosset, Directrice de recherche IRD, Université
de Toulouse (*rapporteuse*)
M. Christophe Cudennec, Professeur,
Institut Agro Rennes Angers (*examineur*)
Mme Claire Delus, Maîtresse de conférences,
Université de Lorraine (*examinatrice*)
M. Adermus Joseph, Professeur associé,
Université d'Etat d'Haïti (*examineur*)

Dlo ki te la anvan tout bagay
Dlo k ap rete lè tout bagay fini
Dlo ki batize timoun la yo
Dlo ki pou lave kadav nou

L'eau qui a précédé toute chose
L'eau qui restera quand tout sera fini
L'eau qui baptise les enfants
L'eau qui nettoie nos cadavres

Dlo lapli dlo larivyè
Dlo fontèn

L'eau de pluie, l'eau de rivière
L'eau des fontaines

Gout dlo nan lawouze gran maten
Wonn dlo nan lalin nouvèl
Dlo ki fe jadin nou bèl
Dlo nou bwè nou kwit manje

Des gouttes d'eau à l'aube
Un tourbillon d'eau à la nouvelle lune
L'eau qui embellit nos jardins
L'eau que nous buvons, l'eau que nous cuisinons

Dlo nan kalbas dlo nan bokit
Dlo nan danmjann

L'eau de la calebasse, l'eau des récipients
L'eau des grandes bouteilles

Dlo nou jete pou rele lespri nou
Dlo nan basen kote simbi rete
Dlo nan letan kote timoun benyen
Dlo nan lannè kote pwason naje

L'eau que l'on jette pour appeler les esprits
L'eau des bassins, habitacle de Simbi : esprit des eaux
L'eau des étangs où les enfants se baignent
L'eau de la mer où nagent les poissons

Dlo basen dlo nan letan
Dlo nan lannè

L'eau des bassins, l'eau des étangs
L'eau de la mer

Tout dlo ki soti nan syèl
Tout dlo ki kouri sou latè
Ban nou fòs pou nou kenbe toujou
Ban nou kouray pou nou sa reziste

L'eau des cieux
L'eau qui ruisselle sur la terre
Accordez-nous la force de continuer à tenir
Accordez-nous le courage de résister

Dlo lawouze dlo nan kaskad
Dlo anba tè

L'eau du matin, l'eau des cascades
L'eau souterraine

Dlo ki bouyi sou dife
Men dlo ki touye dife tou
Dlo ki te la anvan tout bagay
Dlo k ap rete lè tou sa fini.

L'eau bouillante
L'eau qui également tue le feu
L'eau qui a précédé toute chose
L'eau qui restera quand tout sera fini

Dlo de Félix Morisseau-Leroy (1912-1998)

Traduction de Wébert Nathanaël Charles

Remerciements

Je remercie chaleureusement mes deux directeurs de thèse, Dominique Boisson et Pierre Brigode. J'ai beaucoup appris autant sur le plan scientifique que sur la méthode de travail. La pertinence, la réactivité et l'efficacité de mes directeurs de thèse m'ont été d'une grande aide. Travailler avec des personnes si brillantes a été très motivant. Je profite pour re-remercier Dominique Boisson pour tous ses efforts dans la communauté scientifique haïtienne malgré que les conditions n'étaient pas favorables, nous en serons toujours reconnaissants.

Merci à Damienne Provitolo et Nicolas Martin, membres de mon comité de suivi de thèse et merci aussi à Oliver Balieu, Loïc Duffar, François Bourgin, Sandra Soares Fraza et Vincent Moron membres de mon comité technique, pour avoir pris le temps de lire et écouter mes travaux. Vos retours constructifs m'ont permis de prendre le recul nécessaire afin de mieux orienter la thèse. Je remercie également les membres du Jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

J'ai eu la chance d'être accueilli dans trois laboratoires pendant ma thèse, qui m'a permis de faire de nouvelles rencontres, de changer d'environnement et d'apprendre de nouvelles choses. Je remercie l'équipe Risques de Géoazur, spécialement Damienne Provitolo, notre cheffe, et Lise, Raphaël et Yoann mes "premiers" co-bureaux. Un remerciement spécial à toute l'équipe Hydro d'Antony qui m'a accueilli pendant mes deux derniers séjours en France, j'ai énormément appris à vos côtés notamment sur les plans scientifiques et sportives. Ah oui, j'ai appris le Frisbee, un sport que je ne connaissait même pas et finalement que j'ai très apprécié. Un merci à Charles et Vazken pour leur accueil chaleureux et aussi à mes deux co-bureaux : Sarah et Taha. Merci aussi aux membres de l'URGéo qui m'ont accueilli pendant mes séjours en Haïti, spécialement à mes co-bureaux Carlo, Sylvert, Armand et Villiard. J'ai appris énormément à vos côtés et je garde de très bons souvenirs.

Un grand merci à Eddy-Terson François, Douninio Jeanite, Appollon Jean Phillipe et John Claury Ménélas, quatre étudiants de l'Université d'Etat d'Haïti et Kathleen Gerarduzzi, Camille Morillon, trois étudiants l'Université Côte d'Azur que j'ai eu la chance d'encadrer et qui m'ont épaulé dans le travail de numérisation des archives de données historiques. Merci au projet CLIMEXHA (Anticiper les événements CLIMatiques EXtrêmes sur HAïti pour un développement durable), piloté par l'URGéo, qui a financé ce travail de numérisation d'archives historiques. Merci aussi à Armand, Carlo, Kelly, Villiard et l'équipe de la BHS (Bibliothèque Haïtienne des Spiritains) pour leurs supports et leurs participations à ce travail de numérisation d'archives hydro-climatiques historiques.

La thèse a été ponctuée de difficultés administratives que je ne vais pas détailler ici car, peut être à l'avenir, elles pourraient faire l'objet d'une série qui prendrait autant de page que le manuscrit de thèse lui même. Afin de garder l'attente, je vous présente les titres des principaux épisodes : i) Avortement d'un rapatriement militaire, ii) Comment rentrer en Haïti pendant la Covid-19? et iii) Notilus, Etamine et Goelett pour les nuls. Cependant, sans vous spoiler, l'ensemble de ces difficultés ont été surmontées grâce à l'aide de Candice Gaudin, Sandrine Bertetic, Emilie berry, Damienne Provitolo, Boris Marcaillou et Gaëlle Brule mais aussi grâce à mes deux directeurs de thèse. Je vous en remercie grandement.

Je remercie aussi l'Ambassade de France en Haïti, la direction régionale Caraïbe de l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) et la BRH (Banque de la République d'Haïti) de m'avoir octroyé la bourse Anténor Firmin ; l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de m'avoir octroyé la bourse ARTS

(Allocations de Recherche pour une Thèse au Sud) et le LMI CARIBACT d'avoir soutenue financièrement une partie de la thèse.

Je remercie ici tous ceux qui ont contribué à faire de cette thèse une réussite et aussi tous ceux qui ont contribué à faire de moi ce que je suis aujourd'hui, c'est impossible de tous vous énumérer ici tellement que vous êtes nombreux mais vous vous connaissez, et sachez que vous occupez une place importante de mon cœur et j'en suis très reconnaissant et j'essaierai d'être digne de la confiance que vous avez placée en moi.

Résumé

Les inondations des dernières décennies ont mis en évidence la grande vulnérabilité du territoire haïtien aux aléas hydrométéorologiques. Ces événements ont causé de nombreux morts, des dégâts colossaux et affectent durablement les secteurs clefs de l'économie haïtienne. Malheureusement, la fréquence et l'intensité de ces événements hydrométéorologiques auront tendance à augmenter dans les prochaines décennies à cause du changement climatique. Dans ce contexte, il est essentiel d'étudier et de comprendre les comportements hydrologiques des bassins versants haïtiens lors d'épisodes de fortes pluies et de crues, dans le but d'anticiper les dégâts pouvant être engendrés par ces types d'événements. L'objectif général de cette thèse est donc de produire des connaissances visant à une meilleure compréhension et cartographie des aléas hydrométéorologiques en Haïti.

Malheureusement, très peu de données hydrométéorologiques sont disponibles en Haïti, et la plupart des données existantes sont disponibles sur une période historique (1920-1940), et souvent sous forme d'archives papiers. Sur la période récente, des produits de pluies satellitaires sont désormais disponibles à l'échelle globale, mais n'ont encore été que très peu testés dans cette région particulière des Antilles. Ainsi, ce travail de thèse vise à répondre à trois objectifs spécifiques :

1. Rassembler l'ensemble des données hydrométéorologiques existantes en Haïti et numériser certaines archives papiers jugées prioritaires afin de constituer une base de données hydrométéorologiques historique en Haïti utile à l'étude des bassins versants,
2. Evaluer la performance de plusieurs produits de pluies satellitaires afin de guider les utilisateurs sur le choix d'une base de données de pluies alternatives à utiliser en Haïti pour compenser le manque de données de pluies sur la période récente (1980-2017).
3. Analyser l'hydrologie des bassins versants haïtiens à la fois sur une période historique (1920-1940) et sur une période plus récente (1980-2017), en réalisant notamment une analyse fréquentielle des pluies et crues fortes sur l'ensemble des bassins versants étudiés.

Cette thèse a tout d'abord permis de constituer la base de données Simbi, première base de données hydrométéorologiques en libre accès en Haïti. Cette base de données regroupe les séries de données observées (pluies, températures et débits) et des séries de données à l'échelle des bassins versants (pluies, débits observés et simulés, températures et évapotranspirations potentielles) au pas de temps mensuel et journalier sur la période 1920-1940. Cette base de données a permis d'identifier entre 100 et 250 épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940 sur chacun des 21 bassins versants étudiés. Certains de ces épisodes de fortes pluies ont généré des cumuls de pluies entre 500 et 700 mm et des débits maximum pouvant atteindre 100-200 mm/j, notamment dans le sud-ouest d'Haïti.

Sur une période plus récente, l'analyse comparative de plusieurs bases de données de pluies satellitaires dans les Antilles a montré que c'est la base de données de pluies MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation) qui représente le mieux la pluviométrie. MSWEP a été utilisé pour caractériser l'hydrologie haïtienne sur la période récente. L'analyse de ces pluies a montré que la zone la plus humide est le sud-ouest d'Haïti, et la zone la plus sèche est formée par toute la façade ouest (à l'exception du sud-ouest). Les pluies centennales ont été estimés à 450-500 mm/j pour les bassins versants situés dans le sud-ouest d'Haïti, et 100-200 mm/j ailleurs. Les débits centennaux ont quant à eux été estimés comme étant proche de 250 mm/j pour les bassins versants du sud-ouest, et entre 30 et 100 mm/j ailleurs.

Cette thèse constitue la première étude détaillée sur l'hydrologie haïtienne et a permis de décrire le fonctionnement des bassins versants jaugés lors de pluies et crues fortes.

Mot clefs : analyse fréquentielle, modélisation pluie-débit, Grandes et Petites Antilles, Caraïbes, Haïti, inondations, pluies extrêmes, cyclones.

Abstract

Haiti's vulnerability to hydro-meteorological hazards has been highlighted by floods in recent decades. These events caused numerous deaths and colossal damage, and had a lasting impact on key sectors of the Haitian economy. Unfortunately, climate change will tend to increase the frequency and intensity of these hydro-meteorological events in the coming decades. In this context, it is essential to study and understand the hydrological behavior of Haitian catchments during episodes of heavy rainfall and flooding in order to anticipate the damage that can be caused by these types of events. Therefore, the generation of knowledge for a better understanding and mapping of hydrometeorological hazards in Haiti is the overall objective of this thesis.

Unfortunately, hydrometeorological data (such as rainfall or streamflow time series) are very scarce in Haiti, and most of the existing data are for a historical period (1920-1940), often in the form of paper archives. In recent years, satellite rainfall products have become available on a global scale. However, they have not been extensively tested in this particular region of the West Indies. Therefore, three specific objectives are addressed in this thesis :

1. Collect all existing hydrometeorological data in Haiti and digitize certain paper archives considered a priority to create a historical hydrometeorological database in Haiti useful for catchment studies,
2. Evaluate the performance of several satellite rainfall products in order to guide users in the selection of an alternative rainfall database to be used in Haiti, to compensate for the lack of rainfall data for the recent period (1980-2017).
3. Analyze the hydrology of Haitian catchments over both a historical period (1920-1940) and a more recent period (1980-2017), including a frequency analysis of heavy rainfall and flooding over all catchments studied.

The Simbi database, the first hydrometeorological database in Haiti, was created as a result of this work. This database combines observed (rainfall, temperature, and streamflow) and catchment (rainfall, observed and simulated streamflow, temperature, and potential evapotranspiration) series at monthly and daily time steps over 1920-1940. This database identified for each of the 21 catchments studied between 100 and 250 heavy rainfall events during the period 1920-1940. Some of these heavy rainfall events produced rainfall totals between 500 and 700 mm and maximum streamflow of up to 100-200 mm/d, particularly in the southwestern part of Haiti.

For a more recent period, a comparative analysis of several satellite rainfall databases in the West Indies has shown that the Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) database best represents mean rainfall, rainfall patterns, and quantiles of heavy rainfall. Recent Haitian hydrology was characterized using MSWEP. Analysis of rainfall data showed that Haiti can be divided into four homogeneous rainfall zones. The wettest zone is southwestern Haiti. The driest zone is the entire western front (except the southwest). Centennial rainfall was estimated using several frequency analysis methods to be about 450 to 500 mm/d for the catchments in southwest Haiti and between 100 and 200 mm/d for the other catchments. Centennial streamflow was estimated to be close to 200 mm/d for the southwestern basins and between 30 and 100 mm/d elsewhere.

This thesis is the first detailed study of Haitian hydrology, describing the functioning of measured watersheds during heavy rains and floods. It is the first reference for predicting rainfall and streamflow in Haiti.

Keywords : frequency analysis, rainfall-runoff modeling, Greater and Lesser Antilles, Caribbean, flooding, Haiti, extreme precipitation, hurricanes.

Rezime

Inondasyon yo nan dènye deseni yo te mete aksan sou gwo feblès teritwa ayisyen an nan danje idwometeyolojik. Evènman sa yo te lakòz anpil lanmò, domaj kolosal ak afekte sektè kle nan ekonomi ayisyen an. Malerezman, frekans ak entansite evènman idwometeyolojik sa yo ap gen tandans ogmante nan deseni kap vini yo akòz chanjman nan klima a. Nan kontèks sila, li esansyèl pou etidye ak konpwann konpòtman idwolojik basen vèsan ayisyen yo pandan epizòd gwo lapli ak inondasyon, nan objektif pou prevwa dega ki ka koze pa kalite evènman sa yo. Objektif jeneral tèz sa a se pou pwodwi konesans ki vize yon pi bon konpreyansyon ak reprezante sou kat jewografik danje idwometeyolojik nan peyi Ayiti.

Malerezman, pa gen anpil done idwometeyolojik ki disponib pou Ayiti, e pi fò nan done ki egziste deja yo disponib sou yon peryòd istorik (1920-1940), e souvan sou fòm achiv papyè. Nan dènye tan yo, gen done sou lapli ke yo mezire ak satelit, yo disponib kounye a sou yon echèl ki kouvri tout mond lan, men pa gen anpil tèz ki fèt nan Zantiy yo. Kidonk, travay tèz sa a vize satisfè twa objektif espesifik :

1. Rasanble tout done idwometeyorolojik ki egziste an Ayiti epi nimerize kèk achiv papyè yo konsidere kòm priyorite pou yo ka konstitye yon baz done idwometeyorolojik istorik an Ayiti ki ap itil pou etidye basen vèsan yo,
2. Evalye pèfòmans plizyè pwodwi lapli ki mezire ak satelit pou kapab gide itilizatè yo sou chwa yon baz done lapli pou yo itilize an Ayiti, pou konpanse mank done lapli pandan peryòd ki sot pase a (1980-2017),
3. Fè analiz idwolojik basen vèsan ayisyen yo sou yon peryòd istorik (1920-1940) ak sou yon peryòd ki pi resan (1980-2017), espesyalman nan fè yon analiz frekans gwo lapli ak inondasyon sou tout basen vèsan ke yo etidye yo.

Tèz sa a pèmèt premyeman kreye baz done Simbi a, premye baz done idwometeyorolojik an Ayiti. Baz done sa a rasanble yon seri done yo obsève (lapli, tanperati ak debi) ak seri done sou basen vèsan yo (lapli, pousantaj debi obsève ak similasyon, tanperati ak evapotranspirasyon potansyèl) sou chak mwa ak sou chak jou pandan peryòd 1920-1940. Baz done sa a te pèmèt yo idantifye ant 100 ak 250 epizòd gwo lapli pandan peryòd 1920-1940 sou chak nan 21 basen vèsan yo etidye yo. Kèk nan gwo epizòd lapli sa yo bay sòm lapli ki ant 500 ak 700 mm wotè ak pik debi ki rive jiska 100-200 mm/j, sitou nan sidwès Ayiti.

Pandan yon peryòd ki pi resan, analiz konparatif plizyè baz done lapli ke yo mezire ak satelit nan Zantiy yo montre ke se baz done lapli MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation) ki pi byen reprezante plivyometri a. Yo te itilize MSWEP pou yo te karakterize idwoloji an Ayiti pou peryòd ki sot pase a. Analiz lapli sa yo te montre zòn ki pi mouye a se sidwès Ayiti, e zòn ki pi sèk la se tout fasad lwès la ki fòme (ak eksepsyon sidwès la). Yo te estime lapli santanal la a 450-500 mm/j pou basen vèsan ki nan sidwès Ayiti, ak 100-200 mm/j pou lòt kote. Debi santanal yo pre 200 mm/j pou zòn sidwès yo, epi ant 30 ak 100 mm/j lòt kote yo.

Tèz sa a se premye etid detaye ki fèt sou idwoloji an Ayiti epi li pèmèt nou dekri fonksyonman basen vèsan ki yo deja fè mezi sou yo chak fwa gen gwo lapli ak gwo dlo.

Mo kle : analiz frekans, modèl lapli-ekoulman, Gwo ak Ti Zantiy, Karayib, Ayiti, inondasyon, gwo lapli, siklòn.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Rezime	ix
1 Introduction	1
1.1 Pourquoi une monographie hydrologique en Haïti?	1
1.2 Contexte géographique d’Haïti	2
1.3 La problématique des risques naturels en Haïti	5
1.3.1 Risque sismique	5
1.3.2 Risques hydro-climatiques	6
1.4 Etat des lieux du réseau d’observation hydro-météorologique en Haïti	9
1.5 Synthèse des travaux réalisés et en cours	11
1.5.1 Evolution du climat	11
1.5.2 Cartographie du risque d’inondation	13
1.5.3 Projets à caractères opérationnels	13
1.6 Objectifs de la thèse	14
1.7 Organisation du manuscrit de thèse	14
1.8 Cadre institutionnel de la thèse	15
2 Données hydrométéorologiques et modèles pluie-débit utilisées	17
2.1 Objectifs de ce chapitre	17
2.2 Données de pluies	17
2.2.1 Pluies “observées in situ”	18
2.2.2 Bases de données de pluies maillées	20
2.3 Données de températures de l’air	22
2.3.1 Réanalyse ERA-5	22

2.3.2	Réanalyse 20CR	22
2.3.3	BEST (Berkeley Earth Surface Temperature)	22
2.4	Données de débits	22
2.4.1	Disponibilités des séries de débits journaliers	23
2.4.2	Choix des séries de débits	23
2.4.3	Contours des bassins versants	24
2.5	Description des modèles utilisés dans la thèse	26
2.5.1	Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M	26
2.5.2	Description du modèle pluie-débit journalier GR4J	27
2.5.3	Description du modèle d'évapotranspiration potentielle utilisé	28
2.6	Conclusion du chapitre	29
3	Contexte hydro-climatique haïtien : une revue de la littérature	31
3.1	Objectifs du chapitre	31
3.2	Pluie	32
3.2.1	Pluie dans les Antilles	32
3.2.2	Pluies en Haïti	39
3.3	Température de l'air dans les Antilles	43
3.3.1	Variabilité de la température de l'air dans les Antilles	43
3.3.2	Analyse des tendances des températures de l'air dans les Antilles	45
3.4	Evapotranspiration potentielle (ETP) dans les Antilles	45
3.5	Débits dans les Antilles	47
3.6	Pluies et crues fortes dans les Antilles	49
3.7	Hydrologie des bassins versants haïtiens	52
3.7.1	Classification géomorphologique des bassins versants haïtiens	52
3.7.2	Classification hydrologique des bassins versants haïtiens	53
3.7.3	Synthèse de l'hydrologie en Haïti	55
3.8	Conclusion du chapitre	58
I	Analyse de l'hydrologie haïtienne entre 1920 et 1940	59
4	Création d'une base de données hydro-climatique historique en Haïti	61
4.1	Objectifs de ce chapitre	61
4.2	Collecte des données hydro-climatiques disponibles	61
4.3	Numérisation des archives de la BHS	62
4.3.1	Organisation du travail	62
4.3.2	Vérification de la numérisation	63

4.4	Simbi : base de données hydro-climatique historique et signatures hydrologiques de 24 bassins versants haïtiens	64
4.5	Introduction	65
4.6	Data used	66
4.6.1	Streamflow	66
4.6.2	Rainfall	66
4.6.3	Air temperature	67
4.6.4	Berkeley Earth Surface Temperature (BEST)	67
4.6.5	Digital Elevation Model (DEM)	67
4.7	Methodology	68
4.7.1	Selection of streamflow data and catchments	68
4.7.2	Building catchment climate series	69
4.7.3	Water balance	71
4.7.4	Simulation of monthly and daily streamflow series for the period 1920–1940	71
4.7.5	Calculation of catchment attributes	71
4.8	Results	72
4.8.1	Impact of air temperature and PET series on rainfall–runoff modeling	72
4.8.2	Selection of relevant raingauges	72
4.8.3	Water balance	76
4.8.4	Performance of the rainfall–runoff models	76
4.8.5	Catchment attributes	78
4.8.6	Graphical summary sheets of the Simbi database	81
4.9	Data availability	84
4.10	Conclusion and perspectives	84
4.11	Conclusion du chapitre	85
5	Analyse spatio-temporelle des pluies et des débits sur la période 1920-1940	87
5.1	Objectifs de ce chapitre	87
5.2	Analyse des pluies et débits des bassins versants haïtiens	88
5.2.1	Objectifs de cette partie	88
5.2.2	Données utilisées	88
5.2.3	Méthodologie	88
5.2.4	Résultats	89
5.3	Analyse fréquentielle de pluies et de débits de 21 bassins versants haïtiens	105
5.3.1	Objectifs de cette partie	105
5.3.2	Données utilisées	105
5.3.3	Méthodologie	105
5.3.4	Résultats et discussions	107
5.4	Conclusion du chapitre	117

II	Analyse de l'hydrologie haïtienne entre 1979 et 2017	119
6	Performances des produits de pluies maillées dans les Grandes et les Petites Antilles	121
6.1	Objectifs de ce chapitre	121
6.2	Performances de cinq produits de pluies maillées dans les Grandes et les Petites Antilles . . .	121
6.3	Introduction	122
6.4	Study area	123
6.5	Rainfall data used	124
6.5.1	Rain gauge data	124
6.5.2	RGD (Rainfall Gridded Datasets)	126
6.6	Methodology	128
6.6.1	Comparison between RGD grid points and rain gauges temporal series	128
6.6.2	Evaluation of the RGD performances	129
6.7	Results	130
6.7.1	Evaluation of the RGD performances over 1980–2019	130
6.7.2	Evaluation of the RGD performances over 2000–2019	143
6.8	Discussion	146
6.8.1	Comparison of RGD performances	146
6.8.2	Are RGD limitations over Lesser and Greater Antilles site-specific?	146
6.8.3	Limitation of the point-to pixel comparison	147
6.8.4	Uncertainty of the reference rain gauge observations?	147
6.9	Conclusion	147
6.10	Conclusion du chapitre	148
7	Analyse spatio-temporelle des pluies et des débits sur la période 1979-2017	151
7.1	Objectifs de ce chapitre	151
7.2	Variabilité spatio-temporelle des pluies en Haïti sur la période 1979-2017	151
7.2.1	Objectifs de cette partie	151
7.2.2	Données utilisées	152
7.2.3	Méthodologie	152
7.2.4	Résultats	153
7.3	Analyse fréquentielle de pluies et de débits de 21 bassins versants haïtiens	166
7.3.1	Objectifs cette partie	166
7.3.2	Données utilisées	166
7.3.3	Méthodologie	166
7.3.4	Résultats et discussions	167
7.4	Conclusion du chapitre	176

8 Synthèse de l'hydrologie haïtienne	179
8.1 Objectifs de ce chapitre	179
8.2 Données utilisées	179
8.2.1 Données de pluies	179
8.2.2 Données de débits	180
8.2.3 Données de températures de l'air	180
8.2.4 Modèle Numérique de Terrain (MNT)	181
8.3 Méthodologie	181
8.3.1 Comparaison de l'hydrologie haïtienne sur les deux périodes étudiées	181
8.3.2 Analyse de la climatologie haïtienne pendant le XX ^e siècle	181
8.3.3 Cohérence entre l'hydrologie haïtienne et l'hydrologie à l'échelle des Grandes Antilles .	182
8.4 Résultats	182
8.4.1 Comparaison de la pluviométrie des deux périodes étudiées	182
8.4.2 Comparaison des débits des deux périodes étudiées	189
8.4.3 Analyse de la pluviométrie en Haïti entre 1900 et 2017	191
8.4.4 Cohérence des résultats obtenus à l'échelle des Antilles	192
8.5 Conclusion du chapitre	200
9 Conclusions générales et perspectives	203
9.1 Objectifs de ce chapitre	203
9.2 Analyse de l'hydrologie haïtienne sur la période historique	204
9.3 Analyse de l'hydrologie haïtienne sur la période récente	204
9.4 Comparaison des deux périodes étudiées	205
9.5 Apports du travail de thèse	206
9.6 Perspectives	206
9.6.1 Numérisation des archives papiers	206
9.6.2 Renforcement du réseau d'observations hydrométéorologiques	206
9.6.3 Amélioration de l'analyse fréquentielle des pluies et des débits	207
9.6.4 Pertinence des séries de débits historiques	207
9.6.5 Cartographie des inondations	208
9.6.6 Autres perspectives	208
A Liste des annexes	209
A.1 Language de programmation et bibliothèques utilisées	209
A.2 Annexe de l'article soumis à ESSD	209
A.2.1 Vérification de la numérisation	209
A.2.2 Structures des modèles pluie-débit conceptuels GR2M et GR4J	210

A.2.3	Liste des attributs et signatures hydrologiques	210
A.3	Annexes de l'article publié dans JOH :RS	218
A.3.1	Annexe de la comparaison des 5 produits de pluies satellitaires	218
A.4	Cumuls de pluies associés aux évènements marquants listés par le BRGM	221
A.5	Prédétermination des débits des bassins versants haïtiens	227
	Références	239

Chapitre 1

Introduction

1.1 Pourquoi une monographie hydrologique en Haïti ?

Les inondations des dernières décennies ont mis en évidence la grande vulnérabilité du territoire haïtien aux aléas hydrométéorologiques. Ces événements ont causé de nombreux morts, des dégâts colossaux et affectent durablement les secteurs de l’agriculture et de l’élevage, deux secteurs clefs dans l’économie haïtienne. Par exemple, l’année 2004 a été l’une des années les plus meurtrières en Haïti avec plus de 5000 morts, dont 2000 morts liés aux inondations causées par les pluies intenses de mai 2004 dans le sud-est, et 3000 morts causés par la tempête tropicale Jeanne en septembre 2004. En raison de la situation socio-économique précaire d’Haïti, le pays a des difficultés à se relever de ces événements destructeurs. Malheureusement, la fréquence et l’intensité de ces événements hydrométéorologiques auront tendance à augmenter dans les prochaines décennies à cause du changement climatique (Peterson *et al.*, 2002). Ainsi, ces événements hydrométéorologiques constituent un frein considérable au développement du pays. En effet, la situation socio-économique précaire d’Haïti exacerbe la vulnérabilité face aux aléas hydrométéorologiques, qui à leur tour, aggravent la situation socio-économique en Haïti.

Pour freiner ce cercle vicieux, dans un contexte de développement durable, Haïti doit agir pour prévenir et atténuer ces risques. Cependant, une bonne connaissance des aléas est indispensable pour développer des plans d’adaptations et de gestions des risques. Malheureusement, en Haïti, les aléas hydrométéorologiques sont peu étudiés et mal compris. Les seules études existantes sont les travaux de thèse de Joseph (2019) et de Mathieu (2023), thèses réalisées en collaboration entre la FAMV (Faculté d’Agronomie et de Médecine Vétérinaire) de l’UEH (Université d’Etat d’Haïti) et l’Université Catholique de Louvain, qui ont étudié les pluies et les crues associées au cyclone Matthew en octobre 2016 sur le bassin versant de Cavaillon, dans le sud d’Haïti. Ces études ont permis de décrire l’épisode météorologique à l’origine de la crue de la rivière Cavaillon, et de cartographier les inondations associées au cyclone Matthew. Cependant, ces études ont été réalisées sur un seul bassin versant et pour un seul événement pluvieux et appellent des études complémentaires pour généraliser les conclusions obtenues à l’ensemble du pays.

Dans ce contexte, il est donc essentiel de réaliser une étude détaillée sur les pluies et les crues fortes passées et de proposer une cartographie des aléas hydrométéorologiques à l’échelle d’Haïti. L’ensemble de ces connaissances détaillées et complètes sur l’hydrologie en Haïti constituera ainsi une monographie hydrologique en Haïti, comme cela a été réalisée pour plusieurs bassins versants dans le monde par les hydrologues de l’ORSTOM (desormais IRD) (Réméniéras & Boyer, 1950 ; Wyart, 1950 ; Duboe, 1963 ; Ribstein, 1990).

Dans la suite de ce chapitre, le contexte général d’Haïti et la problématique des risques naturels en Haïti sont présentés, en détaillant particulièrement les risques hydro-météorologiques. Ensuite, un état des lieux du réseau d’observation hydrométéorologique et de la disponibilité des données en Haïti est réalisé. Les différents travaux de recherche académiques et opérationnels portant sur les thématiques hydroclimatiques réalisés et en cours de réalisation en Haïti sont aussi présentés. Enfin, les objectifs et le cadre institutionnel de la thèse sont présentés.

1.2 Contexte géographique d'Haïti

Haïti et la République Dominicaine forment l'île d'Hispaniola. Hispaniola se trouve au nord de la mer des Caraïbes et forme l'archipel des Grandes Antilles avec Cuba, la Jamaïque, et Porto Rico (voir la figure 1.1). Haïti (Ayiti en créole haïtien), nom d'origine amérindienne, signifierait *terre des hautes montagnes* ou *la montagne dans la mer* (Jean-Louis, 2012). L'île est rebaptisée Hispaniola par les espagnols, puis Saint-Domingue par les Français. Le 1^{er} janvier 1804, lors de la déclaration de l'indépendance du pays, Haïti reprend son nom d'origine amérindienne. Depuis lors, l'île d'Hispaniola est divisée en deux pays : Haïti qui occupe le tiers occidental de l'île et la République Dominicaine qui occupe la partie orientale.

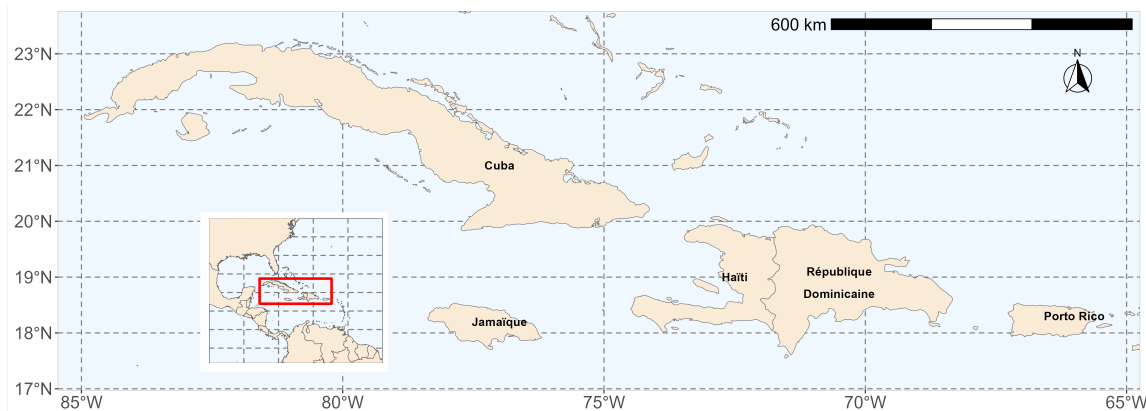


FIGURE 1.1 – Contexte géographique des Grandes Antilles.

La superficie d'Haïti est de 27 750 km² ce qui correspond à la superficie de la région Bretagne en France (27 208 km²). En raison de sa forme en *fer à cheval*, Haïti possède une grande longueur de littoral, soit 1 771 km lorsque l'on y ajoute le littoral de ses petites îles satellites. Au nord, la côte haïtienne s'ouvre sur l'océan Atlantique. Au sud, elle borde la mer des Caraïbes. Au centre, le golfe de la Gonâve s'insère entre les péninsules nord et sud. Outre de nombreux îlots qui longent ce littoral, Haïti possède quatre îles principales, avec par ordre de superficie décroissante : l'île de la Gonâve, l'île de la Tortue, l'île de la Grande Cayemite et l'île-à-Vache (voir la figure 1.2).

Haïti et la République Dominicaine sont les deux pays ayant les altitudes les plus élevées dans la région des Grandes Antilles et à l'opposé, Cuba est le pays ayant les altitudes les plus faibles (voir la figure 1.3). Haïti a une topographie très accidentée (voir la figure 1.2), avec 75% de sa surface caractérisée par des altitudes supérieures à 125 m, 25% à plus de 600 m, et avec une altitude médiane autour de 280 m (voir la figure 1.3). A l'est de la Péninsule du sud, le massif de la Selle possède le plus haut sommet du pays, le pic de la Selle, à 2 680 m d'altitude (voir la figure 1.4). A l'ouest de la même péninsule, le pic Macaya, dans le massif de la Hotte, culmine à 2 347 m. Le centre et le nord du territoire sont marqués par une succession de reliefs et de plaines, d'orientation générale nord-ouest-sud-est, avec du sud vers le nord : la chaîne des Matheux, la plaine et la basse vallée de l'Artibonite, les montagnes Noires, le plateau central, le massif du Nord et enfin, la plaine du Nord. Ces chaînes de montagnes sont caractérisées par de fortes pentes (voir la figure 1.2).

1. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>, consulté le 15 octobre 2023.

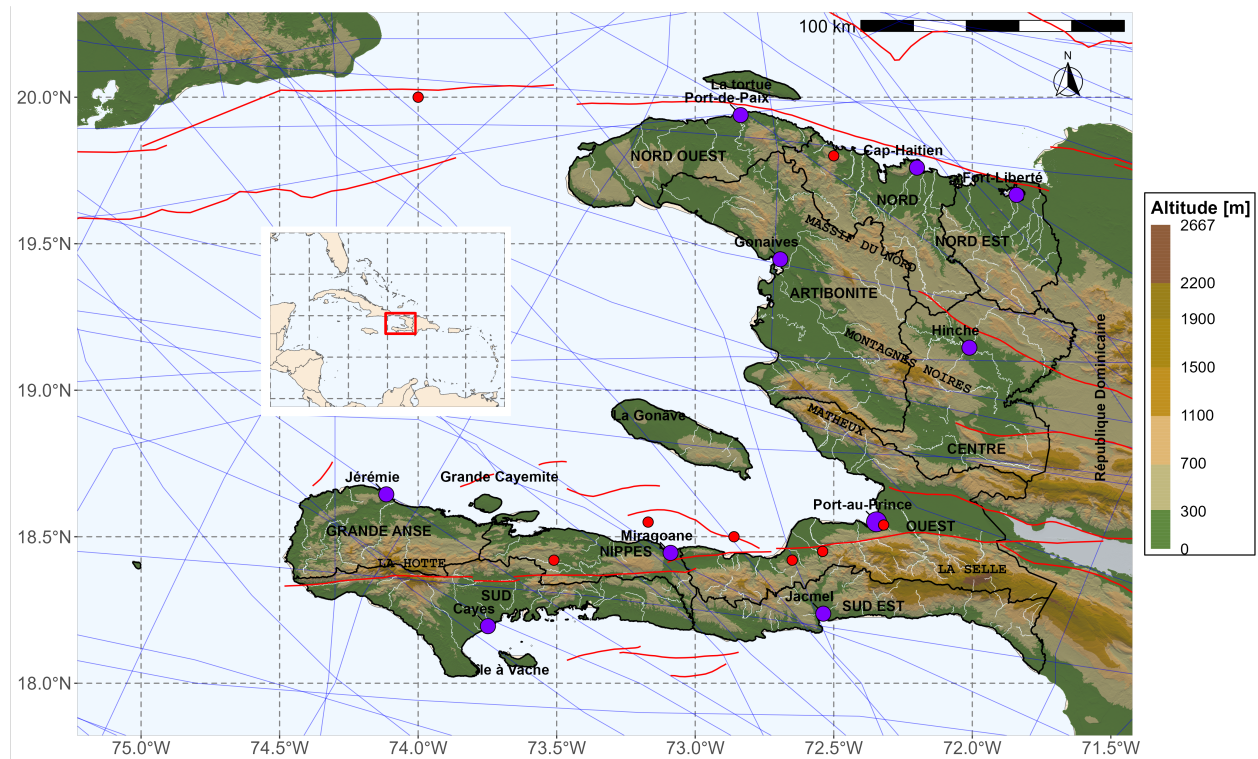


FIGURE 1.2 – Contexte géographique d’Haïti. Les lignes et les points rouges représentent les failles et les séismes majeurs (Styron *et al.*, 2020). Les lignes bleues représentent les trajectoires des cyclones (répertoriés dans la base de données de la NOAA¹) ayant traversé Haïti depuis 1950. Les points violets représentent les chefs-lieux des départements. La topographie en arrière plan est issue des données SRTM (Reuter *et al.*, 2007).

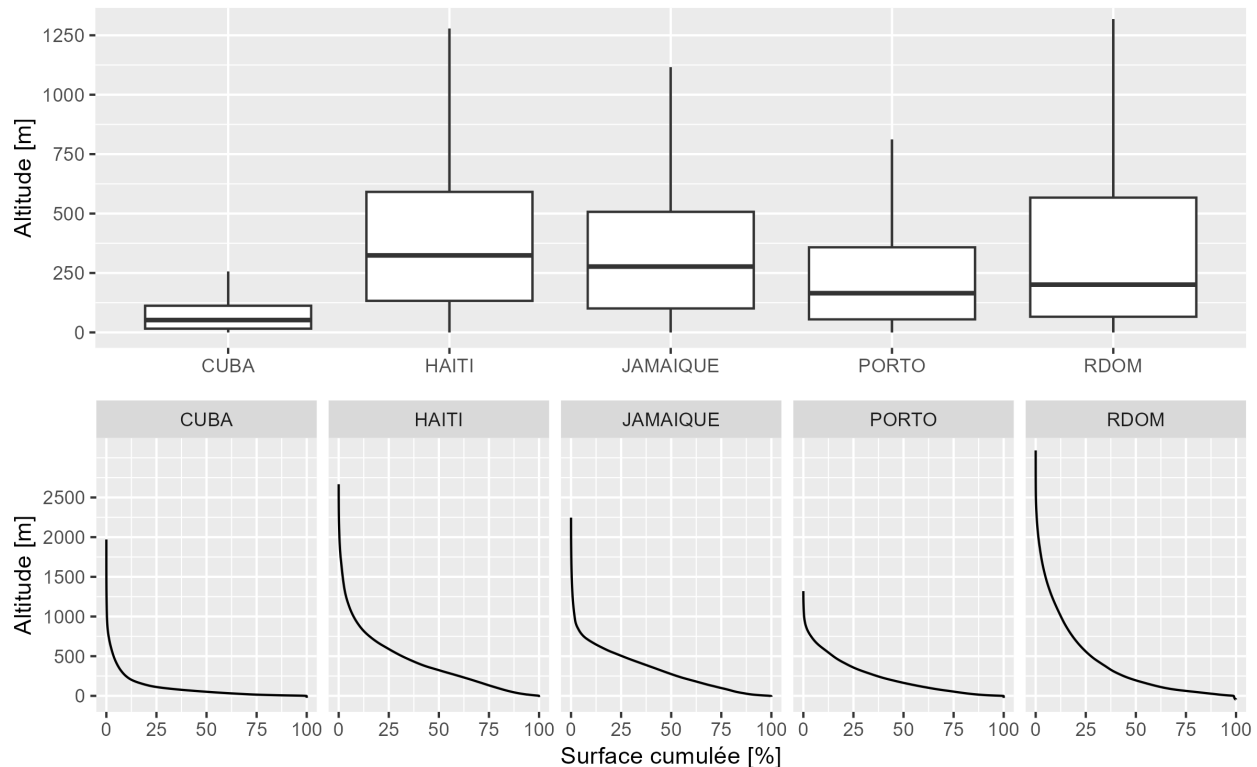


FIGURE 1.3 – En haut, la distribution des altitudes (Reuter *et al.*, 2007) sous forme de boîtes à moustaches et en bas, les fréquences cumulées des altitudes pour les 5 pays des Grandes Antilles. De gauche à droite : Cuba, Haïti, Jamaïque, Porto Rico et République Dominicaine.



FIGURE 1.4 – Une vue du massif de la Selle (crédit photo : UNESCO).

Entre le massif de la selle et la chaîne des Matheux, se trouvent l'étang Saumâtre et la plaine du Cul-de-Sac, ouverte sur le Golfe de la Gonâve. L'étang Saumâtre est le plus grand lac naturel du pays avec une superficie de 181 km². Le fleuve de l'Artibonite est le plus long cours d'eau d'Haïti. Il parcourt 320 km environ depuis sa source, à l'est, dans la Cordillère Centrale, en République Dominicaine, jusqu'à son estuaire près du bourg de la Grande Saline, le long du golfe de la Gonâve, et couvre une superficie d'environ 9500 km². A l'est, proche de la frontière avec la République Dominicaine, le barrage de Péligre retient les eaux de l'Artibonite pour constituer le lac de Péligre. Ce réservoir artificiel couvre une zone de 30 km². Le barrage de Péligre a été mis en service en 1956 pour répondre à un besoin d'irrigation et de réduction des crues. Une usine hydroélectrique a été mise en service en 1971. Du fait d'un envasement important, lié notamment à l'érosion des sols des massifs drainés, il a perdu, en 2015, plus de 56 % de sa capacité d'origine de retenue (Terrier *et al.*, 2017).

Haïti est découpé administrativement en dix départements : le Nord-Est, le Nord, le Nord-Ouest, le Centre, l'Artibonite, l'Ouest, le Sud-Est, le Sud, la Grande Anse et les Nippes. La capitale économique et politique est Port-au-Prince. Elle se trouve dans le département de l'Ouest. La population haïtienne est estimée à près de 12 millions d'habitant (à titre de comparaison, la région française de la Bretagne, caractérisée par une superficie proche de celle d'Haïti, comptait environ 3 millions d'habitants en 2019), dont plus de 35% ont moins de 18 ans selon l'IHSI² (Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique).

1.3 La problématique des risques naturels en Haïti

La situation géographique et géodynamique d'Haïti l'expose à de nombreux aléas naturels : séismes, mouvements de terrain, tsunamis, submersions marines, inondations, cyclones, et sécheresses. Parallèlement, Haïti a fait face à une déforestation massive et une urbanisation anarchique ces dernières décennies (Hedges *et al.*, 2018 ; Mompremier *et al.*, 2022 ; Tarter *et al.*, 2018) qui, amplifié par sa situation économique précaire (une inflation de 48.3%, un PIB d'environ 1280\$ USD et une croissance économique de -1.7% en 2022 selon l'IHSI), font d'Haïti l'un des pays les plus vulnérables face aux aléas hydro-climatiques (Pelling & Uitto, 2011). Dans cette section, nous présenterons les deux principaux risques auxquels fait face Haïti : le risque sismique et les risques hydro-climatiques.

1.3.1 Risque sismique

Haïti se situe dans une zone tectonique très active, à la frontière de deux plaques de l'écorce terrestre : la plaque tectonique caraïbe et la plaque tectonique nord-américaine. Les déplacements relatifs de ces plaques se traduisent par des phénomènes sismiques localisés essentiellement au niveau de deux zones de failles actives majeures, le système de failles Septentrional au nord d'Haïti et le système de failles Enriquillo-Plantain Garden au Sud d'Haïti (voir la figure 1.5).

Scherer (1912) a recensé une quinzaine de séismes historiques majeurs, dont 5 ont été localisés sur le système de failles Enriquillo-Plantain Garden (Bakun *et al.*, 2012). Parmi ces séismes, la mémoire collective se souvient encore des séismes i) du 3 juin 1770, qui a détruit la ville de Port-au-Prince, ii) du 7 mai 1842, qui fut catastrophique pour le grand nord d'Haïti et iii) du 8 avril 1860 à Anse à Veau dans la presqu'île du Sud. Le 12 janvier 2010, Haïti a connu un séisme dévastateur de magnitude 7, dont l'épicentre était situé à Leôgane à 25.3 km de Port-au-Prince (Symithe *et al.*, 2013). Ce séisme a causé plus de 300 000 morts, 300 000 blessés et 1.3 millions de sans-abris (DesRoches *et al.*, 2011). Depuis 2010, plusieurs efforts ont été entrepris pour une meilleure compréhension de l'aléa sismique en Haïti. Parmi les travaux entrepris, on peut citer le projet *ayiti seisme*, qui consiste à mettre en place un réseau sismique avec une approche de science participative (Calais *et al.*, 2020), dont les données sont accessibles au grand public via la plateforme <https://ayiti.unice.fr/ayiti-seismes/>, consulté le 15 octobre 2023. Ce réseau de sismologie citoyenne a d'ailleurs permis de mieux étudier le séisme du 14 août 2021 (Calais *et al.*, 2022a ; Courboux *et al.*, 2021). Ce séisme de magnitude 7.2 (Douilly *et al.*, 2022) a été localisé sur la faille Enriquillo-Plantain Garden dans le département des Nippes, causant

2. <https://ihsi.gouv.ht/>, consulté le 15 octobre 2023.

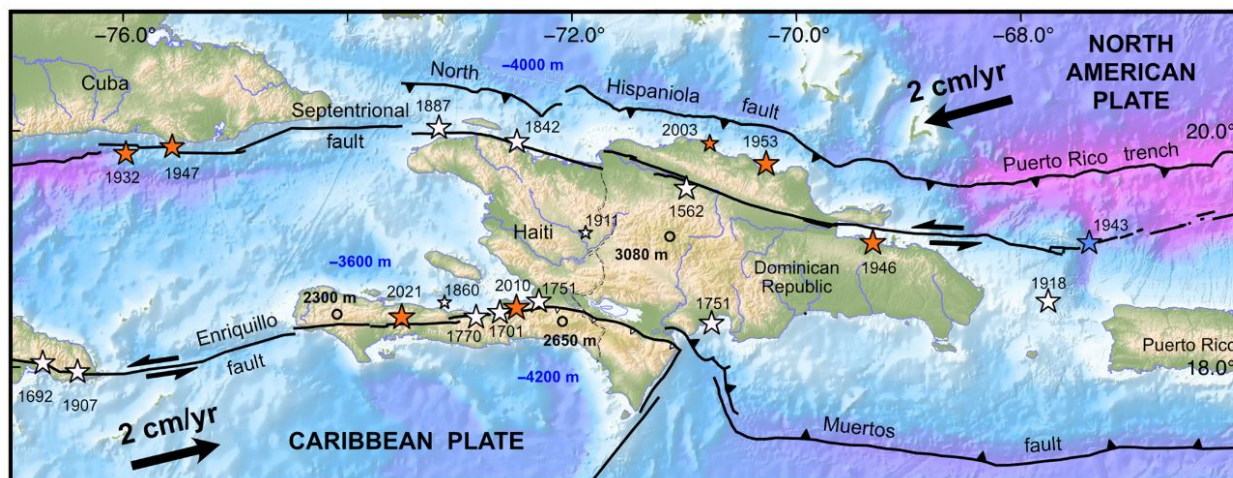


FIGURE 1.5 – Contexte sismotectonique de la région des Caraïbes. Les principales failles actives sont représentées par des lignes noires. Les étoiles indiquent les principaux séismes destructeurs : séismes historiques en blanc, séismes instrumentés en rouge (Calais *et al.*, 2022b).

la mort de 2000 personnes, 15 000 blessés et un impact économique est de l'ordre de 1.6 milliard de dollars américains (Whitworth *et al.*, 2022).

1.3.2 Risques hydro-climatiques

Les événements hydro-climatiques dévastateurs en Haïti sont pour la plupart liés aux inondations causées par les épisodes de pluies intenses (en période cyclonique ou hors cyclone), mais également aux sécheresses. Aucune caractérisation quantitative de ces événements (en terme de fréquence d'apparition, cumuls de pluies, etc.) n'a encore été réalisée, faute de données in situ disponibles. Les seules informations sur ces événements hydro-météorologiques sont disponibles dans un atlas des menaces naturelles en Haïti, réalisé par Terrier *et al.* (2017). Cet atlas rassemble les différents travaux qui ont été réalisés sur les risques naturels en Haïti, dont les risques hydro-climatiques. Pour chacun des risques naturels, Terrier *et al.* (2017) présentent i) une description de l'aléa, ii) les événements majeurs associés à cet aléa et iii) des cartographies de l'aléa et du risque associé. Les informations sur les risques hydro-climatiques disponibles dans cet atlas ont été principalement recueillies auprès du Centre National de Météorologie (actuellement Unité Hydro-Météorologique d'Haïti, UHM), le Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) et le site internet www.Haiti-reference.com.

1.3.2.1 Crues et inondations

Les tableaux 1.1 et 1.2 reprennent les informations concernant les inondations provoquées par les événements cycloniques et les pluies intenses “hors cyclones” listées par Terrier *et al.* (2017). Les paragraphes suivants commentent les inondations les plus marquantes, afin d'illustrer les impacts des crues et inondations récentes en Haïti.

Les villes de Mapou (département du Sud-Est) et de Fonds-Verrettes (département de l'Ouest) ont été inondées par les pluies intenses du 23 et 24 mai 2004. Les pluies ont accéléré le processus de saturation de la couche perméable du sol et ont causé des éboulements sur le territoire haïtien (principalement à Fonds-Verrettes et dans l'Arrondissement de Belle-Anse à Mapou) ainsi que la ville de Jimaní en République Dominicaine. Plus de 2600 morts ont été comptabilisés dans les deux pays, dont plus de 75% en Haïti (Brandimarte *et al.*, 2009). Les cumuls de pluies associés aux pluies intenses du 23 et 24 mai 2004 ont été estimés à 462 mm à Mapou en Haïti et 248 mm à Jimaní en République Dominicaine (Brandimarte *et al.*, 2009). Le 17 et 18 septembre 2004, deux départements (Artibonite et Nord-Ouest) ont été sévèrement touchés

1.3. LA PROBLÉMATIQUE DES RISQUES NATURELS EN HAÏTI

par des pluies torrentielles provoquées par la tempête tropicale Jeanne. La situation a été aggravée dans la ville des Gonaïves (département de l'Artibonite) qui a été submergée d'eaux et de boues pour aux moins deux raisons : i) obstruction des ouvrages de drainage et ii) une partie de la ville des Gonaïves se trouve à une altitude inférieure à celle de la mer. Le bilan de ces inondations s'élève à plus de 3000 morts (plus de 85% aux Gonaïves). Ainsi, les dégâts liés aux événements hydro-climatiques en Haïti pour l'année 2004 ont été enregistrés dans le Nord-Ouest et l'Artibonite suite à Jeanne et à ceux qui au préalable avaient eu lieu en mai dans le Sud-Est.

En moins d'un mois, entre le 16 août et le 8 septembre 2008, Haïti a connu 4 événements cycloniques (Fay, Gustav, Hanna et Ike). La ville des Gonaïves a été particulièrement affectée et selon le chef de la police de l'époque, près de 500 cadavres ont été retrouvés après la baisse des eaux. Il est donc difficile dans ces conditions d'attribuer un bilan pour chacun de ces événements. Néanmoins, les bilans officiels font état de près de 800 morts, dont plus de 700 sont attribuées au cyclone Hanna. Quoi qu'il en soit, cette succession d'événements pluvieux a permis une humidification des sols superficiels, dans un état proche de la saturation, propice aux inondations dévastatrices. Les dégâts matériels ont été estimés à près de 900 millions de dollars, soit 14.6% du PIB d'Haïti (Hurricanes Fay, Gustav, Hanna, and Ike 2008 Haiti Post Disaster Needs Assessment, 2023).

Le cyclone Matthew (voir la figure 1.6), dernier cyclone dévastateur qu'a connu Haïti jusqu'à date, a traversé Haïti les 3 et 4 octobre 2016. Le cyclone a atteint la catégorie 4 lors de son passage en Haïti, premier cyclone de cette catégorie à atteindre la presqu'île du sud depuis les années 1960. Les départements les plus sévèrement touchés ont été la Grande Anse et le Sud. Les rafales de vents (vitesse maximale de 241 km/h) couplées aux épisodes de fortes pluies ont provoqué d'importants dégâts, qui ont été évalués à plus 500 morts et plus d'un milliard de dollars de pertes économiques (Tardieu *et al.*, 2018 ; Benfield, 2017).



FIGURE 1.6 – Représentation du cyclone Matthew lors de son passage en Haïti. Source : The Weather Channel.³

3. <https://weather.com/>, consulté le 15 octobre 2023.

TABLEAU 1.1 – Synthèse des cyclones meurtriers en Haïti de 1935 à 2016 listés par Terrier *et al.* (2017). TS représente les tempêtes tropicales, H1 à H5 représentent les cyclones de catégorie 1 à 5.

Nom	Date	Vitesse du vent [km/h]	Catégorie	Morts	Départements affectés
?	octobre 1935	NA	?	2000	Presqu'île du Sud
Hazel	octobre 1954	194.46	H3	500-1000	10 départements
Flora	septembre 1963	240.76	H4	5000	Presqu'île du Sud et Ouest
Cléo	août 1964	240.76	H4	192	Presqu'île du Sud
Inez	septembre 1966	259.28	H5	700	Presqu'île du Sud et Ouest
Allen	août 1980	259.28	H5	200	Presqu'île du Sud
Gilbert	septembre 1988	203.72	H3	30	Presqu'île du Sud
Gordon	août 1994	74.08	TS	2000	Sud-Est
Georges	septembre 1998	120.38	H1	150	Ouest et Centre
Jeanne	septembre 2004	83.34	TS	3000	Artibonite
Fay	août 2008	83.34	TS	10-20	10 départements
Gustav	août 2008	148.16	H1	90	Presqu'île du Sud
Hanna	août 2008	101.86	TS	780	Artibonite et Nord-Est
Ike	septembre 2008	203.72	H3	?	Nord et Nord-Ouest
Tomas	novembre 2010	138.9	H1	3	Presqu'île du Sud
Isaac	août 2012	101.86	TS	19	Sud-Est et Ouest
Sandy	octobre 2012	185.2	H3	50	Presqu'île du Sud et Ouest
Matthew	octobre 2016	240.76	H4	550	Presqu'île du Sud, Ouest et Nord-Ouest

TABLEAU 1.2 – Synthèse des inondations majeures hors cyclones en Haïti de 1963 à 2014 identifiées par Terrier *et al.* (2017).

Date	Morts	Départements affectés
11 novembre 1963	500	Nord
10 mai 1972	20	Sud
10 juin 1984	?	Nord-Ouest
1 juin 1986	?	Sud
23 octobre 1986	31	Ouest
27 avril 1987	?	Nord-Ouest
8 mai 1987	3	Sud-Est et Ouest
27 janvier 1988	15	Nord-Ouest
20 juin 1988	?	Artibonite
8 octobre 1988	?	Ouest
23 février 1989	?	Ouest
24-27 mai 2002	45	Sud et Nippes
23-24 mai 2004	2675	Sud-Est
4 octobre 2005	?	Ouest
22-23 novembre 2006	?	Grande-Anse, Nippes et Nord-Ouest
17 mars 2007	8	6 départements
8-9 mai 2007	?	Nord, Nord-Est et Sud
20 octobre 2009	5	Ouest
27 février 2010	10	Sud, Ouest et Centre
30 septembre 2010	14	Sud et Nippes
6 juin 2011	29	10 départements
2-4 novembre 2014	9	Nord

1.3.2.2 Sécheresses

A l’opposé des risques liés aux épisodes de fortes pluies, des longues périodes sans ou avec peu de pluies ont causé plusieurs épisodes de sécheresse en Haïti, notamment dans le nord-ouest (Elusma *et al.*, 2022). Ainsi, le tableau 1.3 présente 22 évènements de sécheresse désastreux identifiées entre 1726 et 2014 par Terrier *et al.* (2017). Ces évènements ont affecté l’ensemble du territoire haïtien (principalement le département du Nord-Ouest) et peuvent s’étendre sur plusieurs années. Des épisodes de sécheresse ont été observés entre 2014 et 2017, touchant environ un tiers de la population haïtienne (Monteleone *et al.*, 2020) et plus récemment encore en mars 2023, dans la presque île du Sud^{4 5}.

Haïti étant un pays essentiellement agricole, où l’agriculture contribue à 25% du PIB (Elusma *et al.*, 2022), les sécheresses menacent donc les moyens de subsistance des haïtiens de différentes manières. La diminution des rendements agricoles entraîne une hausse des prix alimentaires qui, à son tour, entraîne une insécurité alimentaire généralisée. L’eau est également un enjeu pour les éleveurs, qui perdent le bétail dont ils dépendent pour la production de lait et la consommation de viande. En résumé, ces sécheresses augmentent l’insécurité alimentaire et sanitaire et peuvent même être la cause de migrations internes.

TABLEAU 1.3 – Synthèse des sécheresses en Haïti de 1726 à 2014 identifiées par Terrier *et al.* (2017).

Date	Départements affectés	Date	Départements affectés
1726	Nord-Ouest	1966-68	Nord-Ouest
1753-54	10 départements	1973-74	Nord-Ouest
1772-74	10 départements	1975	Nord-Ouest
1777	Nord-Ouest	1977-78	10 départements
1779-80	10 départements	1981	Sud et Ouest
1785-86	10 départements	1983	5 départements
1921-22	10 départements	1984-85	Nord-Ouest
1947	Nord-Ouest	1992	10 départements
1957	Nord-Ouest	1996-97	Nord-Ouest
1958-59	10 départements	2003	Nord-Ouest
1964	Nord-Ouest	2014	Nord-Ouest et Nord-Est

1.4 Etat des lieux du réseau d’observation hydro-météorologique en Haïti

Les différents paragraphes de cette section sont une synthèse des informations présentées dans les bulletins hydrographiques annuels (voir la figure 1.7) et dans les rapports d’expertises hydrologiques sur l’état de fonctionnement et des besoins du SNRE (Service National des Ressources en Eau), réalisés par Pouyaud & Hoepffner (1987) et Thebe (1990).

L’analyse et le suivi des ressources en eaux en Haïti étaient placés, jusqu’en 2017, sous le contrôle et la supervision technique du SNRE, coiffée par la Division des Ressources Naturelles au MARNDR (Ministère de l’Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural). Le SNRE a pris naissance en 1922, pendant l’occupation américaine, mais à l’époque de sa création il s’appelait la DHSI (Division Hydrographique du Service d’Irrigation) et était sous la tutelle du ministère des Travaux Publics.

Les premières observations hydrométriques remontent à la période de l’occupation américaine et débutent vers 1919. Ces observations hydrologiques ont été réalisées par la DHSI sous la supervision des ingénieurs américains de la WRS⁶ (Water Ressources Branch) de l’USGS (United States Geological Survey). Cette

4. <https://reliefweb.int/report/haiti/haiti-analyse-des-conditions-de-secheresse-mars-2023>, consulté le 15 octobre 2023.

5. <https://fews.net/latin-america-and-caribbean/haiti/food-security-outlook/february-2023>, consulté le 15 octobre 2023.

6. <https://water.usgs.gov/>, consulté le 15 octobre 2023.

première série d’observations hydrologiques s’achève le plus souvent vers 1930, mais se poursuit parfois jusque dans les années 1940, exceptionnellement plus tard. Les résultats et la description des méthodes mises en place pour la collecte des données ont fait l’objet de la publication annuelle de “bulletin hydrographique” (un exemple de page de couverture est présentée à la figure 1.7). Ainsi, 70 séries de débits sont disponibles sous forme d’archives en papier, sur la période 1920-1940. Depuis ces observations faites entre 1920 et 1940, il existe très peu de données sur l’hydrologie en Haïti (Pouyaud & Hoepffner, 1987).

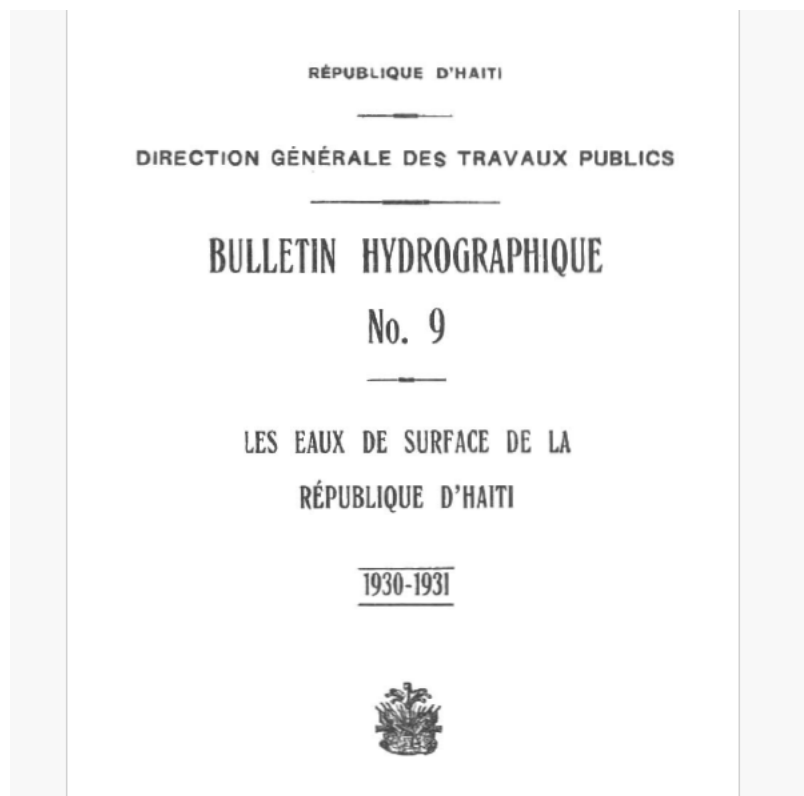


FIGURE 1.7 – Page de couverture du bulletin hydrographique de 1930-1931.

D’autres organismes gouvernementaux ou privés s’occupent aussi d’hydrologie en Haïti avec plus ou moins de continuité. C’est par exemple le cas de l’EDH (Electricité D’Haïti), qui, depuis 1980, gère une quinzaine de stations hydrologiques, indépendamment du SNRE (Pouyaud & Hoepffner, 1987), mais peu d’informations existent actuellement ni sur la gestion de ces stations ni sur les données qui ont été enregistrées. D’autres mesures ont été réalisées dans le cadre de différents projets, mais ces mesures ne sont pas pérennisées et réalisées uniquement pendant les durées des projets. Par exemple, 48 capteurs automatiques de hauteur d’eau et 18 pluviomètres automatiques ont été installés lors du projet PNAP⁷ (Programme Nationale d’Alerte Précoce) de 2011 à 2015, mais ces stations ne sont plus opérationnelles en raison du contexte socio-économique qui ne favorise pas la pérennisation de ces projets et de plus, ces données ne sont pas accessibles.

Les premières mesures pluviométriques ont été réalisées à Port-au-Prince en 1863, ensuite à Gonaïves en 1890, à Pétion-Ville en 1891, et à Ganthier en 1896. Environ 15 nouveaux pluviomètres ont été installés sur le territoire haïtien vers les années 1905. Par la suite, le réseau pluviométrique s’est densifié au cours du temps, avec 25 stations qui dépendaient du Petit-Séminaire Collège St Martial⁸ (établissement scolaire dirigée par la Congrégation du Saint-Esprit), 38 de la Direction Générale des Travaux Publics et près d’un trentaine gérées par d’autres institutions, telles que les frères de l’instruction chrétienne (Pouyaud & Hoepffner, 1987). Ainsi, le réseau d’observation hydrologique (mesure de débits) a été géré par les américains et le réseau d’observation climatique (mesure de pluies) a été géré par les religieux français.

7. https://agriculture.gouv.ht/view/01/IMG/pdf/cges_hydromet_march_23.pdf, consulté le 15 octobre 2023.

8. <https://www.saintmartial.edu.ht/>, consulté le 15 octobre 2023.

Jusqu'en 1977, les données hydrométéorologiques haïtiennes étaient disponibles uniquement sous forme d'archives papiers. De ce fait, le projet *inventaire des ressources hydrauliques* initié par l'état haïtien et réalisé par la firme LGL a permis de répertorier et numériser les 70 séries de débits journaliers sur la période 1920-1940 et près d'une centaine de séries de pluies mensuelles depuis le début des observations jusqu'en 1975. Ces données ont d'ailleurs été utilisées dans les travaux de Moron *et al.* (2015) et de Gaucherel *et al.* (2018) dans le cadre du projet BVH (qui sera décrit plus en détail dans la section 3.7).

Le SNRE a fait plusieurs tentatives pour reprendre les observations hydrométéorologiques en Haïti notamment en faisant appel, en 1986, à l'expertise de l'ORSTOM⁹ (IRD actuellement) dans le but de restructurer, de moderniser et surtout d'informatiser le réseau (Pouyaud & Hoepffner, 1987; Thebe, 1990). C'est ainsi que le SNRE a repris la publication des annuaires hydrologiques en 1988. Malheureusement, cette expérience n'a duré que deux ans, faute de moyens financiers et surtout à cause du contexte politique fortement instable. Depuis lors, aucune observation hydrométéorologique n'a été réalisée de manière continue en Haïti à l'exception du CNIGS (Centre National de l'Information Géo-Spatiale) qui dispose d'une vingtaine de stations pluviométriques automatiques depuis 2014. Néanmoins, ces données pluviométriques ont beaucoup de lacunes et restent très fragmentaires et donc inexploitées à ce jour (Bathelemy & Brigode, 2019).

Avec l'aide de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), le SNRE, le CNM (Centre National de Météorologie) et d'autres structures se sont regroupées en 2017 pour former l'UHM¹⁰ (Unité Hydrométéorologique d'Haïti). La création de l'UHM a pour but de restructurer, dynamiser et moderniser les services hydrométéorologiques en Haïti et principalement son réseau d'observation. Néanmoins, la situation socio-politique extrêmement compliquée en Haïti ne joue pas en faveur de l'UHM et jusqu'à date (en 2023) les données du réseau d'observation hydro-météorologique de l'UHM ne sont pas encore accessibles.

En résumé, il existe une période continue de 20 ans (1920-1940) avec des observations hydro-météorologiques, principalement des données de débits journaliers (disponibles au format numérique), des données de pluies disponibles au format numérique au pas de temps mensuel, mais uniquement sous forme d'archive papier pour les données au pas de temps journalier. Ces données historiques ont été encore très peu analysées, notamment en termes de caractérisation des aléas hydrométéorologiques. Depuis 1940, il n'existe que des données parcellaires, discontinues, peu référencées et difficile d'accès ou même perdues.

1.5 Synthèse des travaux réalisés et en cours

Cette section vise à présenter les principaux projets de recherche menés en Haïti sur l'hydroclimatologie. Ces projets peuvent être groupés suivant trois thématiques :

1. Les projets de recherche sur le climat passé et les projections climatiques du futur,
2. Les projets de recherche sur la cartographie de l'aléa inondation
3. Les projets opérationnels portant sur la mise en place d'un réseau d'observation hydrométéorologique et la prévision météorologique.

1.5.1 Evolution du climat

Les projets sur le climat regroupe différents travaux de thèses (thèses de Carlo Destouches, de David Noncent, de Romual Chery et de Jacky Duvil) et des projets de recherche portés par la FDS (Faculté Des Sciences) de l'UEH (Université d'Etat d'Haïti) et l'ERC2 (Equipe de Recherche sur les Changements Climatiques) de l'UNIQ (Université Quisqueya en Haïti).

La thèse de Carlo Destouches¹¹ intitulée en l'état : *évaluation des sources d'incertitudes dans les scénarii climatiques de précipitation et de température dans la région des Caraïbes et évolution des évènements climatiques extrêmes à Haïti*, a commencée en novembre 2021, et le projet CLIMEXHA (Anticiper les évènements

9. <https://fr.wikipedia.org/wiki/ORSTOM>, consulté le 15 octobre 2023.

10. <https://www.meteo-haiti.gouv.ht/>, consulté le 15 octobre 2023.

11. <https://www.theses.fr/s311444>, consulté le 15 octobre 2023.

CLIMatiques EXtrêmes sur HAïti pour un développement durable), soutenue financièrement par le Fonds pour la Recherche et de Développement de la Banque de la République d’Haïti ¹² sont deux sujets de recherche portés par la FDS. L’objectif principal de ces deux projets de recherches est d’améliorer la prévisibilité des événements climatiques extrêmes et de proposer des scénarios climatiques dans les Caraïbes et en Haïti par une meilleure connaissance des aléas, de leurs évolutions passée et future pour un développement économique et social résilient au changement climatique. Ces projets proposent :

1. de faire une étude rétrospective de l’évolution des températures et des pluies extrêmes sur les 30 dernières années en utilisant principalement les données satellitaires,
2. de décrire les facteurs atmosphériques associés aux situations extrêmes
3. d’évaluer les modèles climatiques dans les Caraïbes et en Haïti, et de caractériser les sources d’incertitudes dans les scénarios climatiques du GIEC pour les Caraïbes.
4. de corriger les biais et fournir des scénarios climatiques désagrégés de pluies et de température.

La thèse de David Noncent (Noncent, 2023) réalisée à l’ERC2 est intitulée *changement, tendance et variabilité climatique en Haïti durant les 1000 dernières années à partir des processus organo-minéraux du lac Azuei*. L’objectif principal de cette thèse a été d’étudier la variabilité environnementale et climatique en Haïti durant les 1000 dernières années afin de progresser de manière significative dans la compréhension de ces variabilités à différentes échelles de temps et les mécanismes océan-atmosphère associés. Pour cela, des analyses sédimentologiques, géochimiques et minéralogiques d’une carotte de sédiment prélevée dans le lac Azuei en Haïti ont été réalisées. Les résultats ont montré qu’Haïti a connu des périodes plus sèches au cours du dernier millénaire et que les précipitations sont liées aux changements moyens dans la température des océans Atlantique et Pacifique, à travers l’Oscillation Multidécennale de l’Atlantique (OMA), l’Oscillation Sud d’El Nino (ENSO) et l’Oscillation Décennale du Pacifique (ODP).

La thèse de Romual Chery (Chery, 2023) réalisée à l’Université des Antilles en Guadeloupe est intitulée *Evolution des régimes de pluies et de précipitations extrêmes en contexte de changement climatique : le cas d’Haïti*. Les principaux objectifs de cette thèse sont :

1. d’étudier l’évolution ds cumuls de pluies aux échelles annuelle, trimestrielle et journalière,
2. d’analyser les régimes de pluies en Haïti,
3. d’étudier l’évolution des occurrences des pluies intenses et extrêmes en Haïti.

En raison du manque de données climatiques en Haïti, Chery (2023) a utilisé la base de données de pluies maillées CHIRPS (Funk *et al.*, 2015b) disponible, au pas de temps journalier, à partir de 1981, et à une échelle spatiale de 0.05° (environ 6 km à l’équateur). Les résultats obtenus par Chery (2023) ont montré que les cumuls de pluies annuelles suivent une alternance de période sèche (autour des années 1985) et une période humide à partir des années 2000. Les mois généralement humides en Haïti (mars à mai, et septembre à novembre) ont tendance à être plus humides au cours du temps. Les résultats obtenus par Chery (2023) ont aussi montré que les mois de décembre à mars correspondent à la saison sèche, les mois d’avril et de mai, et d’août à novembre correspondent aux deux saisons de pluies, et les mois de juin et de juillet correspondent à une période de transition entre les deux saisons de pluies. De plus, la fréquence des fortes pluies a augmenté vers les années 1980 et 2010, et a diminué vers les années 1990 et 2020.

La thèse de Jacky Duvil ¹³ intitulée *perception, vulnérabilité et capacité adaptative face aux impacts du changement climatique en région caribéenne, plus particulièrement sur l’île d’Hispaniola* a commencée en novembre 2021. Pour cela, des enquêtes sont menées auprès des agriculteurs en Haïti et en République Dominicaine afin d’avoir une idée de la perception des agriculteurs face aux impacts du changement climatique afin de proposer différentes mesures d’adaptation.

12. <https://frd.brh.ht/>, consulté le 15 octobre 2023.

13. <https://www.theses.fr/s305804>, consulté le 15 octobre 2023.

1.5.2 Cartographie du risque d'inondation

Des projets de recherche de long terme ont été réalisés dans le cadre d'une coopération entre Haïti et la Belgique et plus spécifiquement entre la FAMV (Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire), l'UCL (Université Catholique de Louvain) et l'ULB (Université libre de Bruxelles). Ces projets de recherche visent à renforcer les capacités d'expertise universitaire de l'équipe du Génie Rural de la FAMV dans le domaine de la caractérisation des crues et de la charge sédimentaire des rivières. Ces projets ont été réalisés dans le sud d'Haïti et principalement sur le bassin versant de Cavaillon (environ 320 km²), et ont fait l'objet de plusieurs thèses dont celles réalisées par Joseph (2019) et Mathieu (2023).

Les travaux de Joseph (2019) ont consisté à caractériser et à modéliser les écoulements de crues de la rivière de Cavaillon. La géométrie du lit de la rivière et des plaines d'inondation ont été estimées à l'aide d'un GPS différentiel et des techniques de photogrammétrie. Ces données couplées aux données de pluies et de débits enregistrées pendant le cyclone Matthew en 2016 ont permis de modéliser les écoulements d'une crue centennale à l'aide du modèle hydraulique unidimensionnel SV1D. Mathieu (2023) a poursuivi les travaux de Joseph (2019) en cartographiant i) l'inondation liée au cyclone Matthew à partir d'un modèle hydraulique 2D et ii) la vulnérabilité du bassin versant de Cavaillon dans le but de produire une carte du risque d'inondation du bassin versant de Cavaillon.

1.5.3 Projets à caractères opérationnels

Trois projets (Hydromet, CREWS (Climate Risk Early and Warning System) et *Gade Lapli*) à caractères opérationnels sont en cours de réalisation. Les principaux objectifs sont la mise en place d'un réseau d'observation hydrométéorologique, la prévision météorologique et la diffusion d'alerte lors des événements hydrométéorologiques.

Les projets Hydromet et CREWS sont deux projets de l'UHM soutenus financièrement par l'OMM. L'objectif du projet Hydromet¹⁴ est de renforcer les systèmes météorologiques et hydrométriques de l'UHM en s'accroissant principalement sur la mise en place d'un réseau d'observation hydrométéorologique. Le projet CREWS¹⁵ a pour but d'améliorer la gestion et les capacités opérationnelles de l'UHM pour permettre une coordination plus robuste avec des capacités techniques et opérationnelles plus solides liées dans le domaine de la prévision météorologique et de la diffusion d'alerte. Ces deux projets devraient être opérationnels en 2024.

Le projet *Gade Lapli*¹⁶ est supporté par le CNES¹⁷ (Centre National d'Etudes Spatiales) en France, et utilise des données satellitaires afin de mettre au point des outils et des services de gestion de crises hydrométéorologiques, et poursuit deux objectifs majeurs :

1. Fournir un support d'assistance en temps réel aux autorités de sécurité civile haïtiennes, à partir des données d'estimation de pluies et de zones inondables issues du projet COSPARIN¹⁸ (CONtribution du SPatial à l'Analyse du Risque Inondation). Le projet COSPARIN est un autre projet à caractère international en collaboration avec le CNES qui fournit des cartes de l'aléa inondation à l'échelle du globe.
2. Créer des indicateurs permettant aux acteurs de l'environnement de suivre l'évolution des événements hydrométéorologiques en s'appuyant sur le nombre d'événements extrêmes et les évolutions des précipitations (fréquence, intensité).

Ce projet *Gade Lapli* réalisé en partenariat avec le CNIGS, le MDE (Ministère de l'Environnement) et l'UHM devrait être opérationnel en 2024.

14. <https://lenouvelliste.com/article/222384/vers-un-plan-strategique-national-pour-le-renforcement-de-luhm>, consulté le 15 octobre 2023.

15. <https://community.wmo.int/en/projects/crews-haiti>, consulté le 15 octobre 2023.

16. <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/gade-lapli>, consulté le 15 octobre 2023.

17. <https://cnes.fr/>, consulté le 15 octobre 2023.

18. <https://business.esa.int/projects/cosparin>, consulté le 15 octobre 2023.

1.6 Objectifs de la thèse

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu qu’Haïti est très exposé et très vulnérable face aux aléas hydrométéorologiques, et malheureusement, à part des données satellitaires, très peu de données hydrométéorologiques continues existent. La plupart des données existantes sont disponibles sur la période 1920-1940, et majoritairement sous forme d’archives papiers. Dans ce contexte, l’hydrologie d’Haïti est très peu étudiée et donc encore peu connue. Actuellement, mis à part quelques études locales (e.g. Joseph (2019) et Mathieu (2023) sur la rivière Cavaillon), il n’existe pas de connaissances sur les ordres de grandeurs des cumuls de fortes pluies observées en Haïti, sur les ordres de grandeurs des débits de pointe que l’on peut observer, etc. De plus, aucune analyse fréquentielle de pluies et de débits n’a été réalisée permettant d’avoir des valeurs de pluies et de débits pour différentes périodes de retour.

Ainsi, cette thèse se propose d’exploiter l’ensemble des données hydrométéorologiques disponibles en Haïti dans le but :

1. d’étudier les relations entre les variables climatiques (pluies et températures) et hydrologiques (débits) et de faire ressortir les principales caractéristiques des bassins versants haïtiens,
2. d’étudier les régimes ainsi que les variabilités interannuelles de pluies et de débits,
3. de caractériser les cumuls, les durées et l’évolution spatio-temporelle des épisodes de fortes pluies ainsi que les débits maximum associés.
4. de faire une analyse fréquentielle des pluies et débits de plusieurs bassins versants haïtiens, afin d’obtenir des valeurs de pluies et débits pour différentes périodes de retour, principalement les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans.

Ce travail sera réalisé sur deux périodes différentes : une période historique (1920-1940, car c’est la seule période durant laquelle les données de débits sont disponibles de manière concomitante avec des séries de pluies) et une période qualifiée de récente (1979-2017, car c’est une période sur laquelle plusieurs produits de pluies satellitaires sont disponibles).

1.7 Organisation du manuscrit de thèse

Le chapitre 2 présente l’ensemble des données climatiques (pluies et températures de l’air) et hydrologiques (débits) ainsi que les modèles (pluie-débit et évapotranspiration potentielle) utilisés dans cette thèse. Ces données ont été rassemblées à la fois à l’échelle des Antilles et à l’échelle d’Haïti et sont constituées par des données observées, des données satellitaires et des données de réanalyses.

Le chapitre 3 fait un état de l’art à la fois à l’échelle des Antilles et à l’échelle d’Haïti des principales composantes du cycle hydrologique telles que la pluie, la température de l’air, l’évapotranspiration potentielle et le débit. Les facteurs ainsi que les types de temps atmosphériques qui influencent la saisonnalité de la pluviométrie à l’échelle des Antilles ont aussi été présentés. Ensuite, les différents travaux réalisés sur l’hydrologie en Haïti ont été résumés.

L’analyse de l’hydrologie des bassins versants haïtiens sur la période historique a été réalisée en quatre étapes et présentée dans la partie I (chapitres 4 et 5). Dans la première étape, les données disponibles ont été rassemblées et les archives papiers ont été numérisées. Dans la deuxième étape, les modèles pluie-débit GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) ont été utilisés pour simuler des séries de débits continus sur la période 1920-1940. Ensuite, ces données simulées et observées ont été utilisées pour caractériser les bassins versants à partir de plusieurs attributs topographiques, géologiques, hydrogéologiques, occupation de sol et signatures hydrologiques. Les données observées et simulées et les attributs des bassins versants ont été rassemblés pour constituer la première base de données hydrologiques en Haïti. Cette base de données permettra une meilleure connaissance des événements passés, ce qui constitue un des fondements de la gestion du risque naturel (Delus *et al.*, 2019, 2021). Ainsi, la troisième étape a consisté à caractériser les épisodes historiques de fortes pluies en étudiant leurs cumuls, leurs durées et leurs évolutions dans le temps. Enfin,

une analyse fréquentielle a été menée afin d'estimer les valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour.

La période récente (1979-2017) est une période durant laquelle très peu de données hydrométéorologiques in situ existent. De ce fait, des bases de données de pluies alternatives obtenues à partir des données satellitaires ont été utilisées pour l'analyse de l'hydrologie des bassins versants haïtiens sur la période 1979-2017. Ces bases de données de pluies permettent d'avoir des estimations de pluies à une échelle spatio-temporelle fine et sont souvent disponibles à partir des années 1980. Ainsi, l'analyse de l'hydrologie des bassins versants haïtiens sur cette période a été réalisée en plusieurs étapes et présentée dans la partie II (chapitres 6 et 7). Dans la première étape, la performance de plusieurs bases de données de pluies satellitaires a été évaluée à partir de plusieurs indices statistiques. La base de données de pluies la plus performante a ensuite été utilisée comme base de données de pluies alternatives en Haïti dans la suite de l'étude. Des séries de débits journaliers ont été simulées à partir du modèle GR4J. Ensuite, comme pour la période historique, les épisodes de fortes pluies ont été caractérisés en étudiant leurs cumuls, leurs durées et leurs évolutions dans le temps. Puis, une analyse fréquentielle a été menée permettant d'estimer les valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour.

Les résultats obtenus sur les deux périodes étudiées ont été comparés dans le chapitre 8, permettant ainsi de synthétiser l'hydrologie haïtienne sur les deux périodes étudiées. Enfin, des conclusions et perspectives sont présentées au chapitre 9.

1.8 Cadre institutionnel de la thèse

L'URGéo (Unité de recherche en géosciences) de la FDS a pris naissance après le terrible séisme du 12 janvier 2010 en Haïti. L'objectif de l'URGéo est de faire progresser la connaissance du sol et du sous-sol de l'écorce terrestre et particulièrement celle du territoire haïtien, et englobe des champs de spécialisation tels que la tectonique, la géotechnique, la sismologie et la géophysique. En 2018, l'URGéo s'associe avec l'IRD¹⁹ (Institut de Recherche pour le Développement) et devient une JEAI²⁰ (Jeune Equipe Associée à l'IRD) avec l'objectif d'inscrire cette jeune équipe dans les réseaux internationaux avec une forte visibilité sur les Caraïbes. En 2021, la JEAI URGéo et l'UMR Géoazur²¹ ont enrichi leur partenariat et ont créé le LMI (Laboratoire Mixte Internationale) CARIBACT²² (aléas naturels, variabilité climatiques et impacts dans le nord des Caraïbes) en Haïti. Ainsi, le champ d'expertise de l'URGéo s'élargit aux risques hydrométéorologiques et à la variabilité climatique.

Cette thèse s'inscrit pleinement dans le cadre du LMI CARIBACT et est réalisée en cotutelle à la fois à l'URGéo et à Géoazur (laboratoire de recherche de l'Université Côte d'Azur en France). La thèse s'est déroulée sous la forme d'alternances de huit séjours de six mois entre France et Haïti. J'ai été accueilli à Géoazur lors de mes deux premiers séjours en France (2019 à 2021), puis au sein de l'Unité de recherche HYCAR²³ de l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) pendant mes deux derniers séjours en France (du fait de la délégation à INRAE de mon directeur de thèse Pierre Brigode). Les séjours en France se sont inscrits dans le cadre du programme Anténor Firmin, qui vise à renforcer les capacités d'enseignement et de recherche des universités haïtiennes et la coopération scientifique entre Haïti et la francophonie. La bourse Anténor Firmin est soutenue par l'ambassade de France en Haïti, la direction régionale Caraïbe de l'agence universitaire de la francophonie et la banque de la république d'Haïti. Les séjours en Haïti ont été soutenus par le programme ARTS (Allocations de Recherche pour une Thèse au Sud) de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

19. <https://www.ird.fr/>, consulté le 15 octobre 2023.

20. <https://www.ird.fr/jeai-urgeo-unite-de-recherche-en-geosciences>, consulté le 15 octobre 2023.

21. <https://geoazur.oca.eu/>, consulté le 15 octobre 2023.

22. <https://www.ird.fr/lmi-caribact-aleas-naturels-variabilite-climatique-et-impacts-dans-le-nord-caraibe>, consulté le 15 octobre 2023.

23. <https://www6.jouy.inrae.fr/hycar/Equipes-de-recherche/HYDRO>, consulté le 15 octobre 2023.

Chapitre 2

Données hydrométéorologiques et modèles pluie-débit utilisées

2.1 Objectifs de ce chapitre

Ce travail de thèse propose de produire une étude complète et détaillée sur l'hydrologie des bassins versants haïtiens. Pour réaliser ce travail, l'ensemble des données climatiques (pluies et températures de l'air) et hydrologiques (débits) disponibles en Haïti ont été rassemblées. Néanmoins, la plupart des données haïtiennes sont disponibles sur une période historique (1920-1940), et pour étudier l'hydrologie haïtienne sur une période plus récente, des données maillées (données satellitaires et réanalyses) ont été utilisées. De plus, pour évaluer la performance de ces données maillées et pour analyser la cohérence des résultats obtenus en Haïti à l'échelle régionale, des données hydrométéorologiques à l'échelle des Antilles ont aussi été utilisées. Ainsi, ce chapitre a pour but de lister :

1. l'ensemble des données hydrométéorologiques (pluies, températures de l'air et débits) qui ont été rassemblées à la fois en Haïti et à l'échelle des Antilles. Ces différentes bases de données seront présentées plus en détail dans les différents chapitres qui suivent.
2. les modèles pluie-débit et le modèle d'évapotranspiration potentielle utilisés dans cette thèse dans le but de croiser les données climatiques aux données hydrologiques par modélisation pluie-débit.

2.2 Données de pluies

Les données de pluies utilisées dans cette thèse sont classées en deux catégories : les données de pluies "observées in situ", c'est à dire mesurées au sol à partir de pluviomètres, et les bases de données de pluies "maillées", issues de différents traitements de données issues de pluviomètres, de modèles météorologiques et/ou de données satellitaires. Les données observées sont disponibles au pas de temps mensuel et au pas de temps journalier (voir la figure 2.1), tandis que les données de pluies maillées sont disponibles au pas de temps journalier et infra-journalier. Une description de ces deux types de données est fournie ci-dessous.

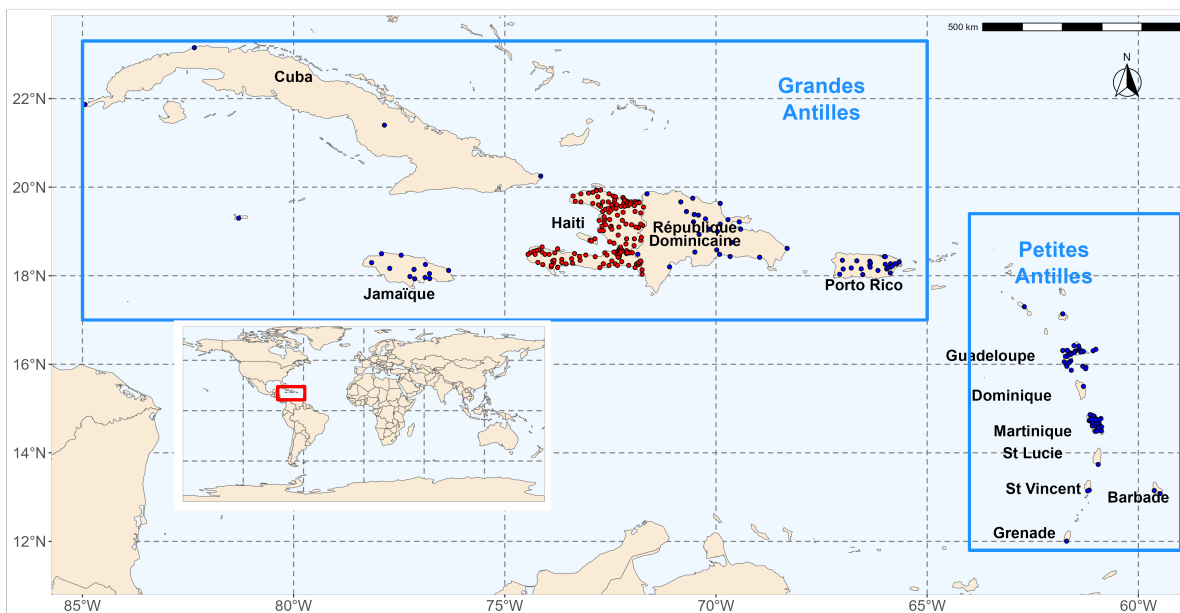


FIGURE 2.1 – Localisation des séries de pluies observées. Les séries de pluies journalières sont renseignées en bleu et les séries de pluies mensuelles sont renseignées en rouge.

2.2.1 Pluies “observées in situ”

2.2.1.1 Pluies mensuelles

Les données de pluies mensuelles utilisées dans cette thèse sont issues de la base de données de pluies construite par Moron *et al.* (2015), et présentée plus en détail à la section 3.2.2. Cette base de données contient 156 séries de pluies mensuelles en Haïti et sont disponibles sur la période 1905-2005.

La figure 2.2 présente les périodes de disponibilités de ces 156 séries de pluies mensuelles. La première figure (figure 2.2 en haut) montre que moins de 25% des stations ont près de 10 ans de données (avec des lacunes), la moitié des stations ont entre 10 et 60 ans de données et les 25% restants ont plus de 60 ans de données. Ces données sont principalement disponibles sur la période 1925-1965 (voir la figure 2.2 en bas).

2.2.1.2 Pluies journalières

Un ensemble de 146 séries de pluies journalières a été rassemblé à l’échelle des Grandes et des Petites Antilles. Ces 146 séries de pluies sont réparties comme suit :

- a. 29 séries de pluies journalières en Martinique qui ont été fournies par Météo France.
- b. 32 séries de pluies journalières en Guadeloupe qui ont été fournies par Météo France.
- c. 5 séries de pluies journalières en Haïti qui ont été fournies par l’UHM (Unité Hydrométéorologique d’Haïti).
- d. 14 séries de pluies journalières dans plusieurs petites îles qui ont été fournies par le CIMH (Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology).
- e. 12 séries de pluies journalières en Jamaïque qui ont été fournies par MetService (le service météorologique de la Jamaïque).

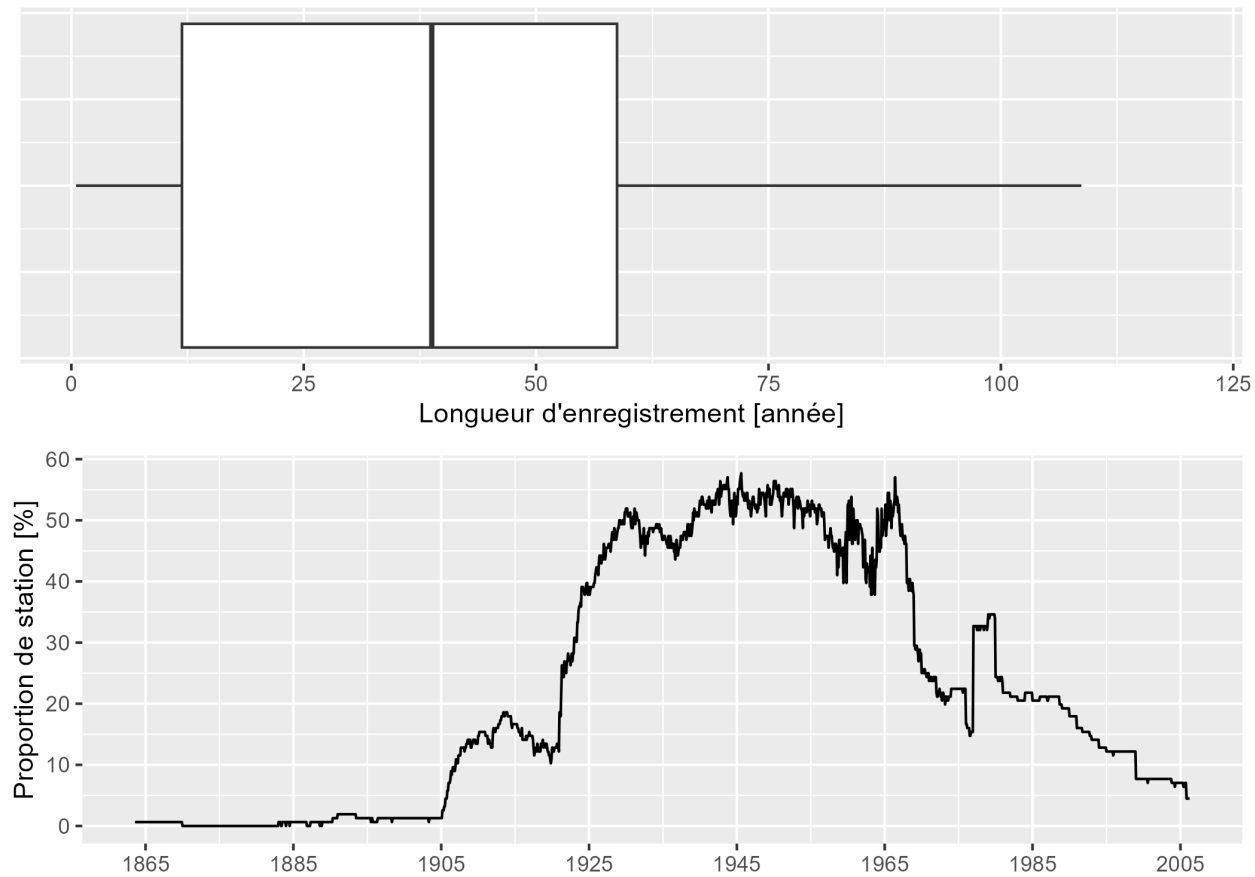


FIGURE 2.2 – Période de disponibilité des séries de pluies mensuelles de la base de données construite par Moron *et al.* (2015) en Haïti. En haut, les longueurs d’enregistrements des 156 stations sous forme de boîtes à moustaches. En bas, le pourcentage de station ayant des données en fonction des années.

- f. 24 séries de pluies journalières à Porto Rico qui ont été fournies par la NOAA ¹ (National Oceanic and Atmospheric Administration).
- g. 4 séries de pluies journalières à Cuba qui ont été fournies par l'InsMet (Institut Météorologique de Cuba).
- h. 26 séries de pluies journalières en République Dominicaine qui ont été fournies par l'ONAMET (Office National de Météorologie de la République Dominicaine).

La figure 2.3 présente les périodes de disponibilité des 146 séries de pluies journalières utilisées dans la thèse. Cette figure montre que la plupart des stations ont entre 30 et 50 ans de données (avec des lacunes), et sont disponibles sur la période 1980-2020, excepté les stations de la Jamaïque qui ont 10 ans de données en moyenne, et sont disponibles sur la période 2012-2020.

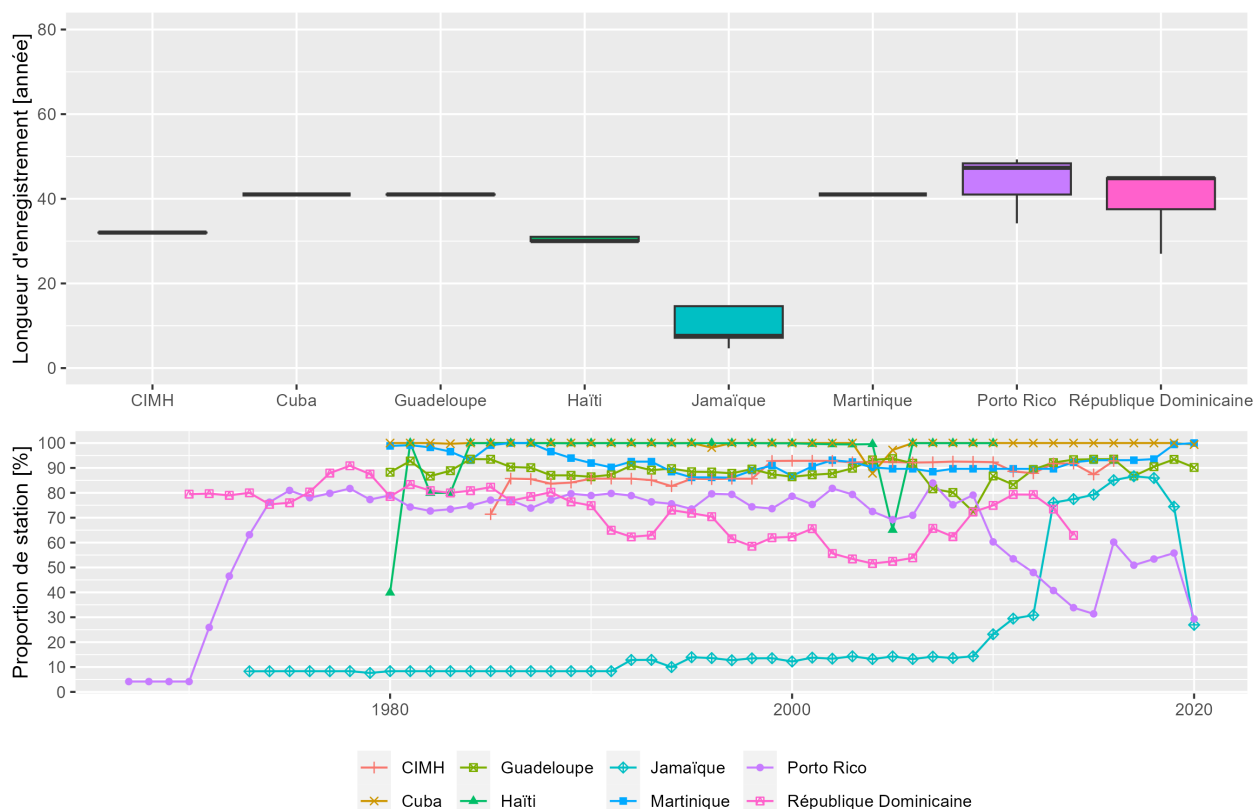


FIGURE 2.3 – Période de disponibilité des 146 séries de pluies journalières reparties dans les Grandes et les Petites Antilles. En haut, les longueurs d'enregistrements de ces 146 stations sous forme de boîtes à moustaches. En bas, le pourcentage de station ayant des données en fonction des années.

2.2.2 Bases de données de pluies maillées

2.2.2.1 MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation)

La deuxième version de MSWEP (Beck *et al.*, 2019) a été utilisée dans cette thèse. Les données MSWEP sont un ensemble de données de pluies disponible à l'échelle mondiale sur la période 1979-2017, avec une résolution spatiale de 0.1° (environ 11 km à l'équateur), et une résolution temporelle de 3 h. Cet ensemble de données est dérivé de la fusion des estimations de précipitations basées sur des pluviomètres de différents

1. <https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/>, consulté le 15 octobre 2023.

pays, des données de pluies satellitaires et des données de réanalyse (cf. article de Beck *et al.*, 2019 pour plus de détails).

2.2.2.2 CHIRPS (Climate Hazards Infrared Precipitation with Station data)

La deuxième version de CHIRPS (Funk *et al.*, 2015b) a été utilisée dans cette thèse. Les données CHIRPS sont disponibles à partir de 1981 au pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 0.05° (environ 6 km à l'équateur). Cette base de données utilise la climatologie des précipitations mensuelles CHPClim (Climate Hazards Group Precipitation Climatology, Funk *et al.*, 2015a), les observations par satellite géostationnaire infrarouge thermique, la mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) 3B42 v7 (Huffman *et al.*, 2007), les champs de précipitations du modèle atmosphérique de la NCEP CFS (Climate Forecast System, Saha *et al.* (2010)) et des observations de précipitations provenant de différentes sources, y compris les services météorologiques nationaux ou régionaux (cf. article de Funk *et al.*, 2015b pour plus de détails).

2.2.2.3 PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks–Climate Data Record)

PERSIANN-CDR (Ashouri *et al.*, 2015) est un produit de pluies maillées disponible à partir de 1983 au pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 0.25° (environ 28 km à l'équateur). Les données PERSIANN-CDR ont été obtenues à partir du réseau de neurone artificiel PERSIANN, qui a été pré-entraîné avec les données radar de précipitations horaires de niveau IV du NCEP (National Centers for Environmental Prediction, Fulton *et al.*, 1998) et les données infrarouges GridSat-B1 (Knapp *et al.*, 2010). Le produit final est ajusté avec le produit mensuel GPCP (Global Precipitation Climatology Project, Adler *et al.*, 2003) pour garantir que les deux ensembles de données sont cohérents à l'échelle mensuelle.

2.2.2.4 GPM-IMERG (Global Precipitation Measurement - Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)

Le produit de pluies maillées GPM-IMERG (Huffman *et al.*, 2015) est le successeur du produit de pluies maillées TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis, Huffman *et al.*, 2007; Huffman *et al.*, 2010). La version 6.3 de GPM-IMERG a été utilisée dans cette thèse et est disponible à partir de 2000, à une résolution spatiale de 0.1° (environ 11 km à l'équateur), et à une résolution temporelle de 30 min. Ces données ont été obtenues à partir des données satellitaires infrarouges et micro-ondes (Hou *et al.*, 2014) et des bases de données de pluies mensuelles pour la correction des biais (Schneider *et al.*, 2014).

2.2.2.5 Réanalyse ERA-5

Les données de pluies de la réanalyse ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) ont été utilisées dans cette thèse. Les données ERA-5 sont disponibles à partir de 1980 avec une résolution spatiale de 0.25° (environ 28 km à l'équateur), et avec une résolution temporelle d'une heure. ERA-5 est produit par le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). Cette réanalyse récente remplace la réanalyse ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) débutée en 2006. ERA-5 bénéficie de décennies de développement de modèles atmosphérique d'assimilation de données (Hersbach & De Rosnay, 2018) provenant de plusieurs satellites et d'observations. ERA-5 utilise l'assimilation de données variationnelles en quatre dimensions (4D-Var) d'observations satellitaires, de radar et in situ (incluant des données de pluies et de température de l'air).

2.2.2.6 Réanalyse 20CR

La troisième version des données de pluies du projet 20CR (Twentieth Century Reanalysis, Slivinski *et al.*, 2019) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) a été utilisée dans cette thèse. Ces données sont disponibles au pas de temps journalier, et à une échelle spatiale de 1° (111 km à l'équateur) sur

la période 1836-2015. Cette réanalyse a été construite en assimilant que les données de pressions de surface (cf. Slivinski *et al.*, 2019 pour plus de détails).

2.3 Données de températures de l'air

Les données de températures de l'air utilisées dans cette thèse sont issues de deux réanalyses (ERA5 et 20CR) et d'une reconstitution statistique des températures globales (BEST), et sont toutes les trois sous la forme de données maillées.

2.3.1 Réanalyse ERA-5

La base de données de températures de l'air de la réanalyse ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) a été utilisée dans cette thèse. Cette base de données est disponible à la même résolution spatio-temporelle que les données de pluies de la réanalyse ERA-, au pas de temps horaire et sur la période 1980-2020.

2.3.2 Réanalyse 20CR

La base de données de températures de l'air de la réanalyse 20CR (Slivinski *et al.*, 2019) a été aussi utilisée dans cette thèse. Cette base de données de températures de l'air est disponible à la même résolution spatio-temporelle que les données de pluies de la réanalyse 20CR, au pas de temps journalier sur la période 1836-2015.

2.3.3 BEST (Berkeley Earth Surface Temperature)

La base de données de températures de l'air BEST (Rohde *et al.*, 2013) a été utilisée dans cette thèse. BEST a été obtenu par interpolation spatiale avec la méthode du krigeage (Krige, 1951 ; Cressie, 1990) des données de températures de l'air observées à travers le monde. Les données sont disponibles à partir de 1753 au pas de temps mensuel, et 1880 au pas de temps journalier, et disponibles à une résolution spatiale de 1° (111 km).

2.4 Données de débits

Les séries de débits continus sur le long terme sont accessibles pour 3 pays des Grandes Antilles : Haïti, Jamaïque et Porto Rico. Ainsi, les données de débits rassemblées et utilisées dans cette thèse sont constituées de 70 séries de débits journaliers en Haïti, 84 séries de débits journaliers en Jamaïque et 20 séries de débits journaliers à Porto Rico.

Les 70 séries de débits journaliers en Haïti ont été numérisées par la LGL (1977) dans le cadre du projet d'inventaire des ressources hydrauliques en Haïti. Ces données nous ont été fournies par Cédric Gaucherel, responsable du projet BVH (ce projet sera décrit plus en détail dans la section 3.7). Les données de débits en Jamaïque ont été récupérées en ligne sur le site internet du service hydrologique de la Jamaïque WRA² (Water Resources Authority). Les données de débits à Porto Rico ont été récupérées en ligne dans la base de données GRDC³ (Global Data Runoff Center).

2. <http://webmapjam.dyndns.pro/webmap/app/db/index.php>, consulté le 15 octobre 2023.

3. https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html, consulté le 15 octobre 2023.

2.4.1 Disponibilités des séries de débits journaliers

La figure 2.4 présente les disponibilités des séries de débits journaliers : les proportions de stations ayant des données disponibles sont présentées en haut, et les longueurs d'enregistrement effectives des stations en bas.

Cette figure montre que les séries de débits haïtiennes sont disponibles de 1920 à 1931 et jusqu'en 1940 pour environ 20% d'entre elles. La figure du bas montre que la moitié des stations en Haïti est caractérisée par des séries de 2 à 16 ans de données (avec des lacunes) et 25% des stations ont plus de 16 ans de données. Les enregistrements ont commencé en 1955 pour une vingtaine de stations en Jamaïque, et c'est à partir de 1970 que plus de la moitié des 84 stations en Jamaïque ont des données disponibles. La figure du bas montre que la moitié des stations en Jamaïque est caractérisée par des séries de 38 à 58 ans de données et 25% des stations ont plus de 58 ans de données. Les mesures de débits ont débutées vers les années 1960 à Porto Rico et le nombre de stations croît avec le temps jusqu'à atteindre 20 stations vers les années 2000. La figure du bas montre que la moitié des stations à Porto Rico est caractérisée par des séries de 33 à 55 ans de données et 25% des stations ont plus de 57 ans de données.

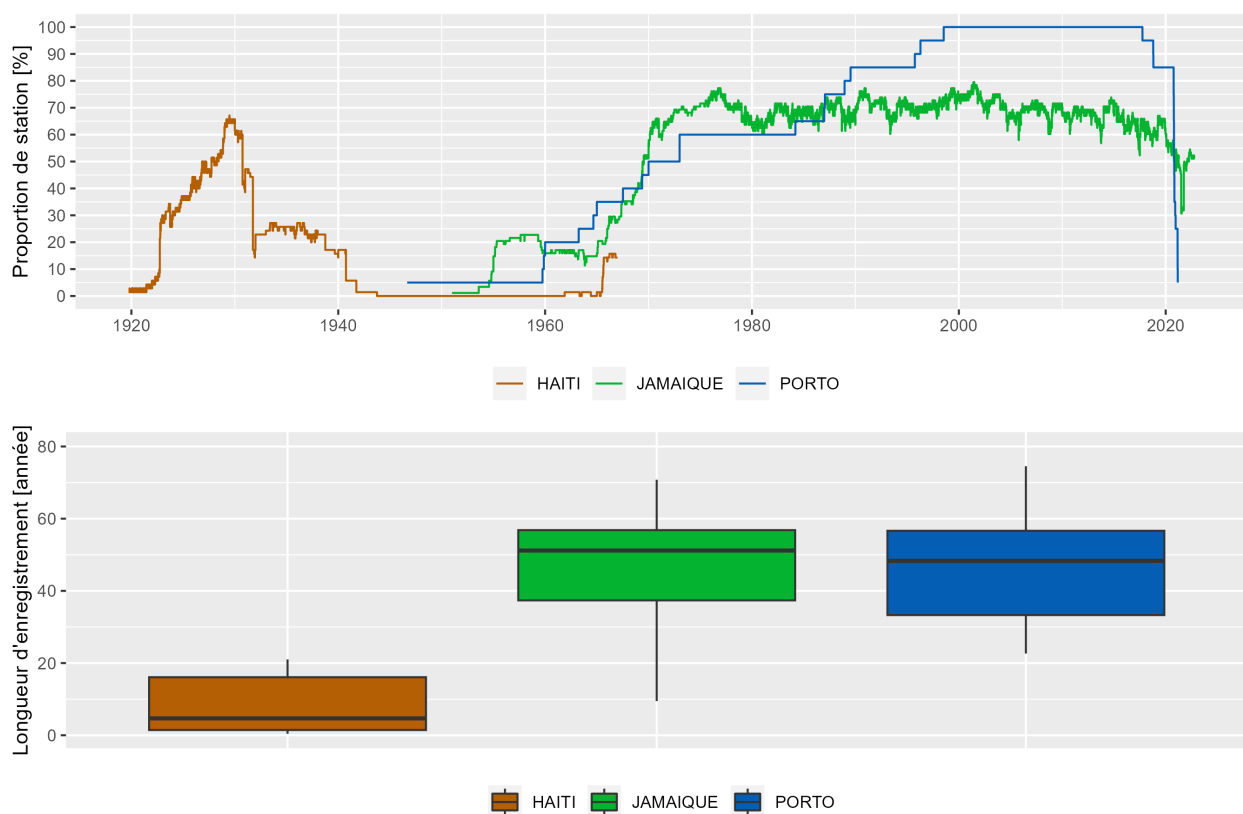


FIGURE 2.4 – Période de disponibilité des séries de débits journaliers. En haut, le pourcentage de stations ayant des données en fonction des années. En bas, les longueurs d'enregistrements des stations sous forme de boîtes à moustaches.

2.4.2 Choix des séries de débits

Les bulletins hydrographiques annuels contenant les séries de débits haïtiennes ont été analysés dans le but de sélectionner les séries de débits haïtiennes "hydrologiquement pertinentes". Quatre critères ont été utilisés pour ce choix :

1. les bulletins hydrographiques annuels ont notifié la précision avec laquelle les courbes de tarage ont été établies avec trois mentions : “bien établie”, “assez bien établie” et “pauvrement établie”. La plupart des séries de débits ayant des courbes de tarage dites “pauvrement établies” se sont avérées présenter des écarts de mesure considérables entre périodes. De ce fait, les séries de débits dont les courbes de tarages sont “pauvrement établies” n’ont pas été utilisées.
2. certaines stations hydrométriques étaient situées en aval de canaux de dérivation ou de petits barrages utilisés pour l’irrigation. Ces séries de débits représentent mal la saisonnalité des débits, et sont donc considérées comme influencées par l’activité humaine. Ces séries de débits n’ont pas été utilisées.
3. certaines stations hydrométriques étaient situées en aval de résurgences ou de sources. Ces résurgences d’eaux souterraines sont hors de la portée de ce travail, qui se limite aux écoulements de surface en rivière. Ainsi, ces séries de débits n’ont pas été utilisées.
4. les séries de débits ayant moins de 5 ans de données n’ont pas été utilisées.

A la suite de ces critères, seules 24 séries de débits haïtiens sur les 70 disponibles ont été utilisées.

Nous n’avons pas eu accès à des informations détaillées pour les stations en Jamaïque et à Porto Rico comme c’était le cas pour les stations haïtiennes. De ce fait, les séries de débits jamaïcaines et portoricaines utilisées dans cette thèse ont été choisies à partir d’une analyse visuelle, dans le but d’écarter des séries de débits présentant des anomalies, c’est à dire des enregistrements non naturels qui peuvent être des valeurs de débits erronées ou des influences anthropiques pouvant conduire à une mauvaise interprétation des processus hydrologiques réels (Strohenger *et al.*, 2023). Néanmoins, cette méthode est subjective et les séries de débits choisies dépendent de l’utilisateur.

Après cette analyse visuelle, les 20 séries de débits journaliers à Porto Rico et 20 des 84 séries de débits journaliers en Jamaïque ont été retenues. Les localisations des stations de débits sont présentées à la figure 2.5.

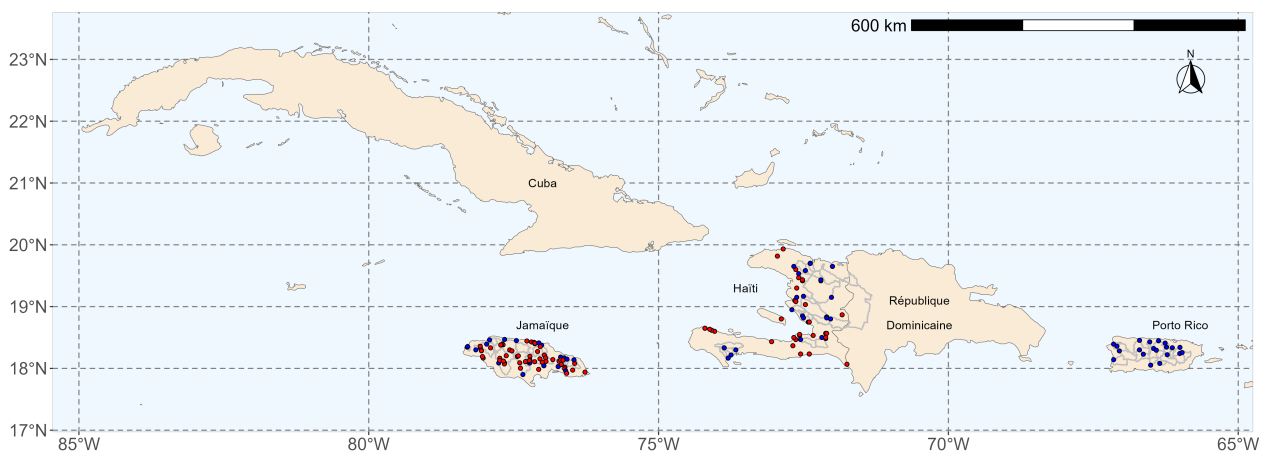


FIGURE 2.5 – Localisation des stations de débits. Les points (rouges et bleus) représentent l’ensemble des stations, et les stations en bleu représentent les stations retenues.

2.4.3 Contours des bassins versants

Les contours des bassins versants correspondant aux séries de débits sélectionnées ont été délimités à partir du modèle numérique de terrain SRTM de 90 m de résolution (Reuter *et al.*, 2007) et de l’algorithme TauDEM (Tarboton *et al.*, 2005). Certains cours d’eau obtenus numériquement se sont révélés être décalés par rapport aux cours d’eau “réels”, principalement dans les régions plates, à proximité des embouchures. Les stations hydrométriques ont donc été relocalisées sur les cours d’eau obtenus numériquement. Par la suite, les surfaces

des bassins versants obtenues numériquement ont été comparées à celles fournies par les services hydrologiques en Jamaïque et à Porto Rico, et celles retranscrites dans les bulletins hydrographiques pour les bassins versants haïtiens, et des différences significatives ont été observées entre les deux superficies. Ainsi, le processus de relocalisation des stations a été répété plusieurs fois jusqu'à ce que l'erreur entre les deux superficies soit inférieure à 10%.

La figure 2.6 présente les ratios entre les surfaces obtenues numériquement et celles fournies par les services hydrologiques. Cette figure montre que les ratios sont très proches de 1 pour les bassins versants en Haïti et à Porto Rico, c'est à dire que les surfaces obtenues numériquement sont très proches de celles fournies par les services hydrologiques. A l'inverse, les surfaces obtenues numériquement ne correspondent pas aux surfaces fournies pour certains bassins versants en Jamaïque, malgré le procédé de relocalisation des stations. Les surfaces obtenues numériquement ont été utilisées dans la suite de la thèse, car les surfaces fournies par le service hydrologique de Jamaïque semblent douteuses. En effet, des surfaces nulles et proches de zéro sont renseignées pour plusieurs bassins versants et des valeurs sont manquantes pour d'autres. Pour cela, les surfaces obtenues numériquement ont été utilisées.

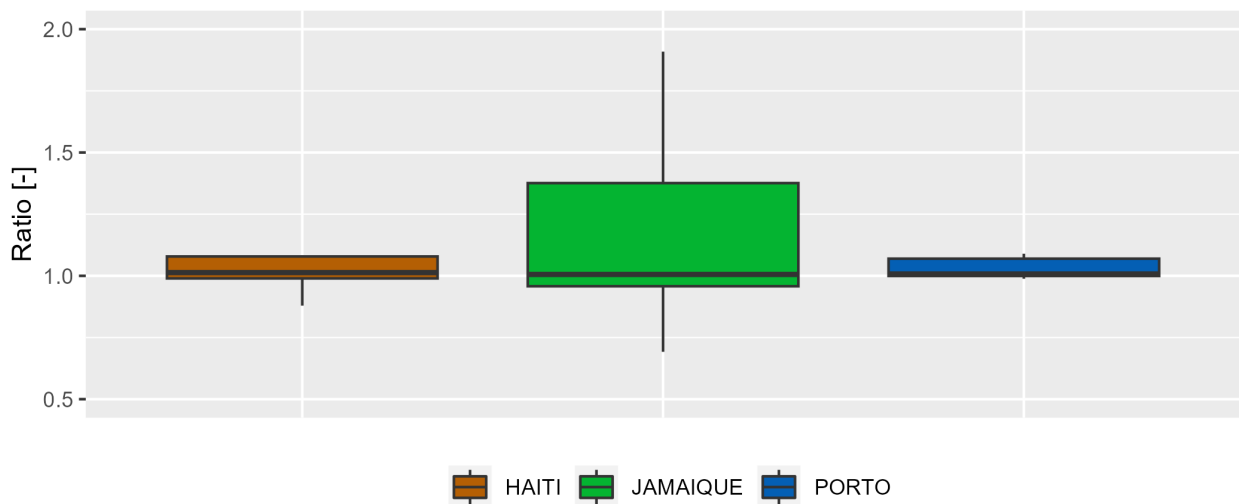


FIGURE 2.6 – Ratios entre les surfaces des bassins versants obtenues numériquement et celles fournies par les services hydrologiques pour les 64 bassins versants (24 en Haïti, 20 en Jamaïque et 20 à Porto Rico).

La figure 2.7 présente les altitudes des stations de jaugeage à gauche et les superficies des bassins versants obtenues numériquement à droite. Cette figure montre que les altitudes des stations haïtiennes sont plus élevées que celles en Jamaïque et en Porto Rico. Les altitudes ont une valeur médiane de 130 m en Haïti et entre 20 et 60 m en Jamaïque et à Porto Rico. La figure 2.7 montre aussi que les superficies des bassins versants sont du même ordre de grandeur (100-350 km²) pour les trois pays. Néanmoins, deux bassins versants en Haïti ont des superficies supérieures à 6000 km².

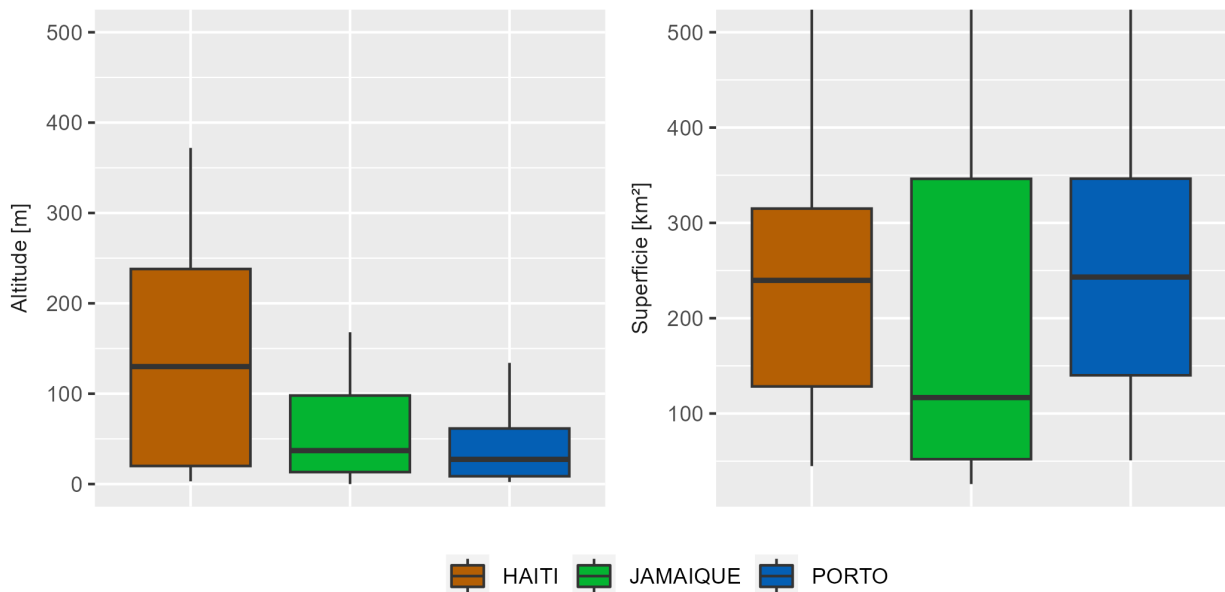


FIGURE 2.7 – À gauche : les altitudes des stations sous forme de boîtes à moustaches. À droite : les superficies des bassins versants drainés sous forme de boîtes à moustaches.

2.5 Description des modèles utilisés dans la thèse

Deux modèles pluie-débit ont été utilisés dans cette thèse : le modèle GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) pour la modélisation au pas de temps mensuel et le modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003) pour la modélisation au pas de temps journalier. Les descriptions de ces deux modèles, qui sont présentées dans les paragraphes suivantes, sont inspirées des travaux de Perrin *et al.* (2007).

Ces deux modèles pluie-débit ont besoin des apports d'évapotranspiration potentielle (ETP) en entrée. Ainsi, le modèle d'ETP proposé par Oudin *et al.* (2005) a été utilisé pour estimer des séries d'ETP à partir des données de températures de l'air. Ce modèle sera aussi présenté dans les prochains paragraphes.

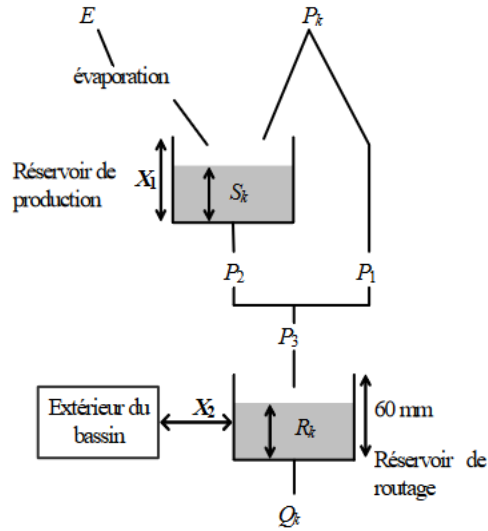
2.5.1 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref (actuellement HYCAR⁴) à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya & Michel (1991), Makhoul (1994), Makhoul & Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006) qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin. La figure 2.8 présente un schéma de la structure du modèle GR2M. Veuillez consulter les travaux de Mouelhi *et al.* (2006) pour plus de détails sur la description mathématique de ce modèle.

4. <https://www6.jouy.inrae.fr/hycar/Equipes-de-recherche/HYDRO>, consulté le 15 octobre 2023.

FIGURE 2.8 – Schéma de la structure du modèle GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006).

Le modèle a deux paramètres à caler :

1. X_1 [mm] : capacité du réservoir de production,
2. X_2 [-] : coefficient d'échanges souterrains.

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance 90%
X_1 [mm]	380	140 à 2640
X_2 [-]	0.92	0.21 à 1.31

2.5.2 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno & Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno *et al.* (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.* (2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin *et al.* (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le comportement hydrologique du bassin versant.

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel. La figure 2.9 présente un schéma de la structure du modèle GR4J. Veuillez consulter les travaux de Perrin *et al.* (2003) pour plus de détails sur la description mathématique de ce modèle.

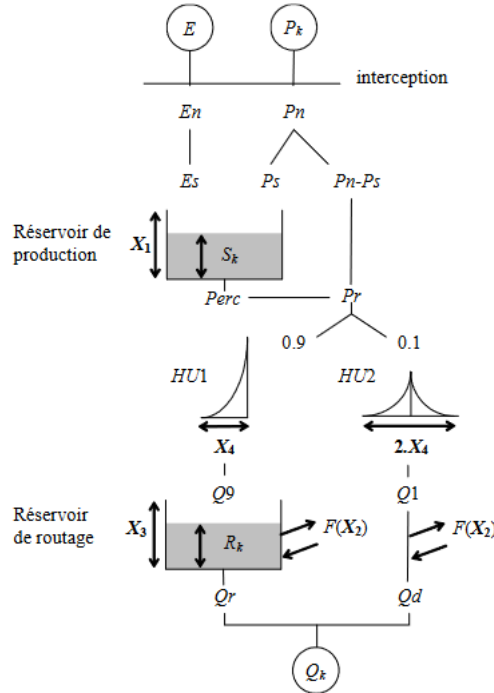


FIGURE 2.9 – Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003).

Le modèle GR4J a quatre paramètres à caler :

1. X_1 [mm] : capacité du réservoir de production,
2. X_2 [mm/j] : coefficient d'échanges souterrains,
3. X_3 [mm] : capacité à un jour du réservoir,
4. X_4 [j] : temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$.

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau 2.2.

TABEAU 2.2 – Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance 80%
X_1 [mm]	350	100 à 1200
X_2 [mm/j]	0	-5 à 3
X_3 [mm]	90	20 à 300
X_4 [j]	1.7	1.1 à 2.9

2.5.3 Description du modèle d'évapotranspiration potentielle utilisé

Les modèles GR2M et GR4J présentés précédemment ont tous deux besoin de séries d'ETP en entrée. Ainsi, le modèle d'ETP proposé par Oudin *et al.* (2005) a été utilisé dans cette thèse. Ce modèle a été choisi pour sa performance pour la modélisation pluie-débit comparé à 27 autres modèles d'ETP et de sa simplicité. En

effet, plusieurs études ont évalué l'impact d'une connaissance imparfaite de l'ETP sur l'efficacité des modèles pluie-débit (Morton, 1994 ; Evans, 2003 ; Joukainen, 2000 ; Lindroth, 1993 ; Andersson, 1992 ; Nandakumar & Mein, 1997 ; Parmele, 1972 ; Andréassian *et al.*, 2004). Les résultats obtenus sont tous concordants et montrent un manque de sensibilité des modèles pluie-débit aux apports d'ETP et que des hypothèses très simples sur l'apport de l'ETP donne les mêmes résultats qu'un apport plus précis. D'un point de vue opérationnel, le choix du modèle d'ETP à utiliser dans cette thèse (dans un contexte avec peu de données disponibles) a été fait parmi les modèles moins exigeants en données. Pour cela, le modèle proposé par Oudin *et al.* (2005) a été utilisé.

Le modèle d'ETP proposé par Oudin *et al.* (2005) n'a besoin que des données de température de l'air et du rayonnement extraterrestre qui lui même dépend de la latitude du bassin versant à étudier et du jour julien. La formulation mathématique de ce modèle est donnée selon l'équation suivante : $ETP = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda \rho 100}$ si $T_a + 5 > 0$ et $ETP = 0$ sinon.

Où ETP [mmj^{-1}] est le taux d'évapotranspiration potentielle, R_e [$\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$] est le rayonnement extraterrestre, λ [MJkg^{-1}] est le flux de chaleur latente (pris égal à 2.45 MJkg^{-1}), ρ [kgm^{-3}] est la densité de l'eau et T_a [$^{\circ}\text{C}$] la température de l'air.

2.6 Conclusion du chapitre

L'ensemble de données de pluies, de températures de l'air et de débits utilisé dans cette thèse a été présenté dans ce chapitre. Ces données comprennent :

- a. 156 séries de pluies mensuelles disponibles en Haïti sur la période 1905-2005,
- b. 146 séries de pluies journalières dans les Grandes et Petites Antilles, et disponibles sur la période 1980-2020,
- c. 70 séries de débits journaliers disponibles en Haïti sur la période 1920-1940,
- d. 84 séries de débits journaliers disponibles en Jamaïque à partir de 1955,
- e. 20 séries de débits journaliers disponibles à Porto Rico à partir de 1960,
- f. des bases de données de pluies et de températures de l'air maillées (données satellitaires et de réanalyses).

Parmi les séries de débits disponibles, 64 ont été choisies comme étant des séries de débits "hydrologiquement pertinentes" (24 en Haïti, 20 en Jamaïque et 20 à Porto Rico) et ont été utilisées dans la suite de la thèse. Les bassins versants associés ont des superficies comprises entre 100 et 350 km^2 , avec cependant deux bassins versants haïtiens pour lesquels les superficies sont supérieures à 6000 km^2 .

De plus, deux modèles pluie-débit ont été présentés : le modèle GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) qui a été utilisé pour la modélisation au pas de temps mensuel et le modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003) qui a été utilisé pour la modélisation au pas de temps de journalier. Enfin, le modèle d'ETP proposé par Oudin *et al.* (2005) a été présenté. Ce modèle permet d'estimer des séries d'ETP à partir des données de températures de l'air.

Chapitre 3

Contexte hydro-climatique haïtien : une revue de la littérature

3.1 Objectifs du chapitre

Ce chapitre propose de faire un état de l'art des grandeurs essentielles dans l'étude de l'hydrologie des bassins versants que sont la pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP), la température et le débit. Cette étude bibliographique est réalisée à l'échelle régionale des Caraïbes/Antilles, puis à l'échelle d'Haïti lorsque cela est possible. Néanmoins, l'ETP et le débit sont moins étudiés que la pluie et la température de l'air dans cette région. Pour cela, une analyse des débits et de l'ETP a été réalisée afin d'apporter au non spécialiste de la région des informations de base.

La première partie de ce chapitre décrit la climatologie régionale en présentant la pluie, la température de l'air et l'ETP. La variabilité interannuelle et infra-annuelle de la pluie à l'échelle régionale est présentée. Ensuite, les principaux facteurs atmosphériques qui influencent les régimes de pluies à l'échelle régionale, et les classifications des différents types de temps atmosphériques et leurs relations avec la saisonnalité des pluies dans la région sont décrits. Puis, la pluie en Haïti a été résumée.

Par manque de données disponibles, peu d'études ont analysé les régimes et les variabilités interannuelles des températures de l'air et des ETP à l'échelle des Antilles. Ainsi, des ordres de grandeurs des moyennes mensuelles et annuelles pour les pays des Grandes Antilles ont été présentés pour :

1. les températures de l'air, calculées à partir des données de la réanalyse ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020),
2. les évapotranspirations potentielles, calculées à partir des données de température de l'air ERA-5 et la formule d'Oudin *et al.* (2005).

La deuxième partie de ce chapitre décrit l'hydrologie régionale en présentant :

1. les régimes et les variabilités interannuelles des débits, calculés à partir des données présentées à la section 2.5,
2. les pluies et les crues fortes identifiées à l'échelle régionale,
3. les études menées sur l'hydrologie en Haïti dans le cadre du projet BVH (Bassins Versants Haïtiens) réalisé entre 2012 et 2016.

3.2 Pluie

3.2.1 Pluie dans les Antilles

3.2.1.1 Variabilité des pluies dans les Antilles

Le régime des pluies dans les Caraïbes (Grandes Antilles inclus), décrit par Martinez *et al.* (2019), est divisé en 4 saisons (voir la figure 3.1) :

1. la WDS (winter dry season) de mi-novembre à avril,
2. l'ERS (early rainy season) de fin-avril à juin,
3. la MSD (mid-summer drought) de juin à août,
4. la LRS (late rainy season) de fin août à novembre.

La WDS est relativement sèche et les trois autres sont des périodes humides (Gamble & Curtis, 2008 ; Taylor *et al.*, 2002 ; Curtis, 2013). Deux pics de précipitations sont généralement observés, le premier vers mai-juin (pendant l'ERS), et le second vers septembre-octobre (pendant la LRS), et sont séparés par une diminution relative des précipitations en juillet, pendant la MSD (Maldonado *et al.*, 2016).

Plusieurs études ont évalué les cumuls de pluies de chacun des 4 saisons de pluies (Martinez *et al.*, 2019 ; Centella-Artola *et al.*, 2020 ; Jury, 2009b). Cependant, ces études n'ont pas été réalisées sur les mêmes périodes et n'ont pas utilisé les mêmes données de pluies, ce qui engendrent des différences dans les valeurs obtenues. Néanmoins, toutes les études ont bien capturé le cycle bimodal des précipitations. Ainsi, les moyennes mensuelles dans la région caribéenne sont de 55 à 170 mm pendant la WDS, 140 à 280 mm pendant l'ERS, 130 à 220 mm pendant la MSD et 150 à 300 mm pendant la LRS. Cependant, la pluviométrie est très variable d'un pays à l'autre avec des cumuls de pluies plus élevés à Porto Rico et relativement faibles à Cuba. En effet, les travaux de Martinez *et al.* (2019) et de Moron *et al.* (2015) montrent que les ordres de grandeurs des pluies moyennes mensuelles sont de l'ordre de :

1. 60 mm à Cuba, 75 mm en Haïti et 135 mm à Porto Rico pendant la WDS,
2. 150 mm à Cuba, 200 en Haïti et 240 mm à Porto Rico pendant l'ERS,
3. 120 mm à Cuba, 140 en Haïti et 180 mm à Porto Rico pendant la MSD,
4. 240 mm à Cuba, 270 en Haïti et 340 mm à Porto Rico pendant la LRS.

Des études sur la variabilité inter-annuelle des précipitations suggèrent un cycle quasi-décennal dans le climat caribéen (Jury, 2009a), mais les avis divergent sur les dates des périodes sèches et humides. Par exemple, Peterson *et al.* (2002) et Taylor *et al.* (2002) ont identifié des périodes humides à la fin des années 1960 et des périodes sèches de 1970 à 1980 et au début des années 1990. Hastenrath & Polzin (2013) de leur côté ont mis en évidence une alternance de périodes humides (1931-1938 et 1950-1956) et de périodes sèches (1939-1947 et 1971-1978). Par contre, Jones *et al.* (2016) ont montré qu'il n'y a pas de tendances significatives dans la pluviométrie annuelle et les alternances des périodes humides et sèches identifiées par les autres auteurs sont difficiles à voir. Néanmoins, Jones *et al.* (2016) met en évidence des anomalies des pluies annuelles qui peuvent aller jusqu'à 400 mm (voir la figure 3.2) et donc, bien qu'il n'y a pas de tendances significatives, les alternances d'années sèches et humides ne sont pas totalement absentes.

A l'échelle inter-annuelle, les précipitations dans les Caraïbes semblent être modulées par les fluctuations océaniques à grande échelle à travers les phénomènes ENSO (El Niño Southern Oscillation) et NAO (North Atlantic Oscillation). Les événements El Niño ont tendance à réduire les précipitations dans les Caraïbes en modifiant le cisaillement vertical du vent et en augmentant la subsidence (Taylor *et al.*, 2002). Un réchauffement de l'Atlantique nord (phénomène NAO) est observé au printemps boréal après un pic d'un événement El Niño et semble être associé à des précipitations supérieures à la normale (Enfield, 1996 ; Anthony Chen & Taylor, 2002 ; Taylor *et al.*, 2002 ; Hu *et al.*, 2011 ; George & Saunders, 2001).



FIGURE 3.1 – Quelques régimes de pluies dans les Caraïbes (Martinez *et al.*, 2019). Les courbes en bleues représentent les régimes calculés avec les pluviomètres et les courbes en orange, ceux calculés avec le produit de pluies maillées TRMM (Huffman *et al.*, 2010). Les courbes en trait plein représentent les moyennes glissantes sur cinq jours. Antigua et Barduda (a), Porto Rico (b), Belize (c), Amérique centrale (d), Cuba (e) et Floride (e).

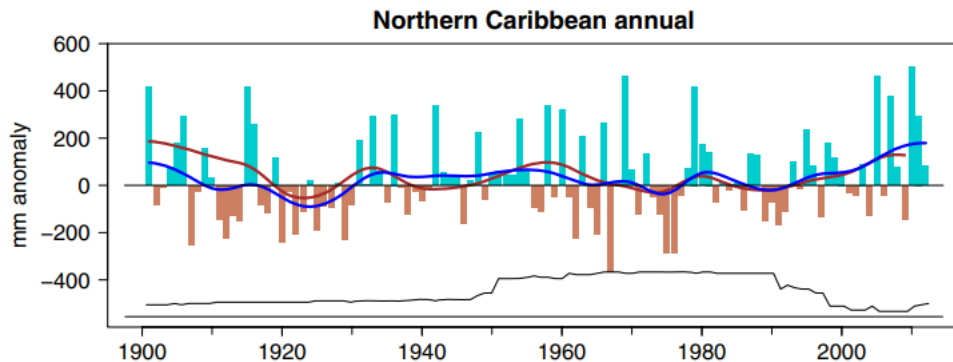


FIGURE 3.2 – Anomalies de pluies annuelles, calculées avec la base de données pluies CRU TS 3.21 (Harris *et al.*, 2014), par rapport à la période de référence 1961-1990 dans les Grandes Antilles (Jones *et al.*, 2016).

3.2.1.2 Les facteurs atmosphériques qui influencent la pluie dans les Antilles

Les facteurs atmosphériques qui influencent le cycle saisonnier des précipitations dans les Caraïbes sont présentés à la figure 3.3, et sont :

1. L'ITCZ (InterTropical Convergence Zone, Hastenrath (2002)) qui est une bande tropicale de convection associée à des alizés, des fortes pluies et des basses pressions (Henderson-Sellers & Robinson, 1986 ; Zhang, 2001 ; Hastenrath, 2002).
2. La NASH (North Atlantic Subtropical High, Davis *et al.* (1997)). La NASH est un anticyclone présent dans l'Atlantique nord qui suit un schéma de variabilité semestrielle, avec ses pics d'intensités en été et en hiver (Davis *et al.*, 1997 ; Giannini *et al.*, 2000). Le printemps et l'automne sont caractérisés par des périodes de transition de la NASH qui se traduisent par des vents d'est et une subsidence¹ plus faible (Davis *et al.*, 1997 ; Wang & Lee, 2007).
3. L'AWP (Atlantic Warm Pool, Wang & Enfield (2001)) qui correspond à la zone où la température de l'océan Atlantique est supérieure à 28.5°C. Le début et la durée de l'AWP sont synchronisés avec le début et la durée de la saison des pluies dans les Caraïbes (Misra *et al.*, 2014). Son émergence et son expansion affaiblissent la NASH et les vents d'ouest en altitude au-dessus des Caraïbes (Wang & Lee, 2007) et augmentent les précipitations (Wang *et al.*, 2008).
4. Le CLLJ (Caribbean Low-Level Jet) qui est situé entre le nord de l'Amérique du Sud et les Grandes Antilles et s'étendant à l'ouest des Caraïbes, est un important transporteur d'humidité pour les Caraïbes et l'Amérique centrale (Durán-Quesada *et al.*, 2010). Des études ont attribué la genèse du CLLJ à l'intensification des vents d'est par la NASH (Wang, 2007 ; Cook & Vizzy, 2010) et sa force et son orientation sont influencées par l'AWP (Wang & Lee, 2007), la NASH (Cook & Vizzy, 2010) et la topographie (Muñoz *et al.*, 2008).
5. Des mécanismes localisés tels que les brises de mer ainsi que le soulèvement orographique affectent l'ampleur des précipitations.
6. Les cyclones tropicaux.

1. affaissement d'une masse d'air dans un anticyclone.

3.2. PLUIE

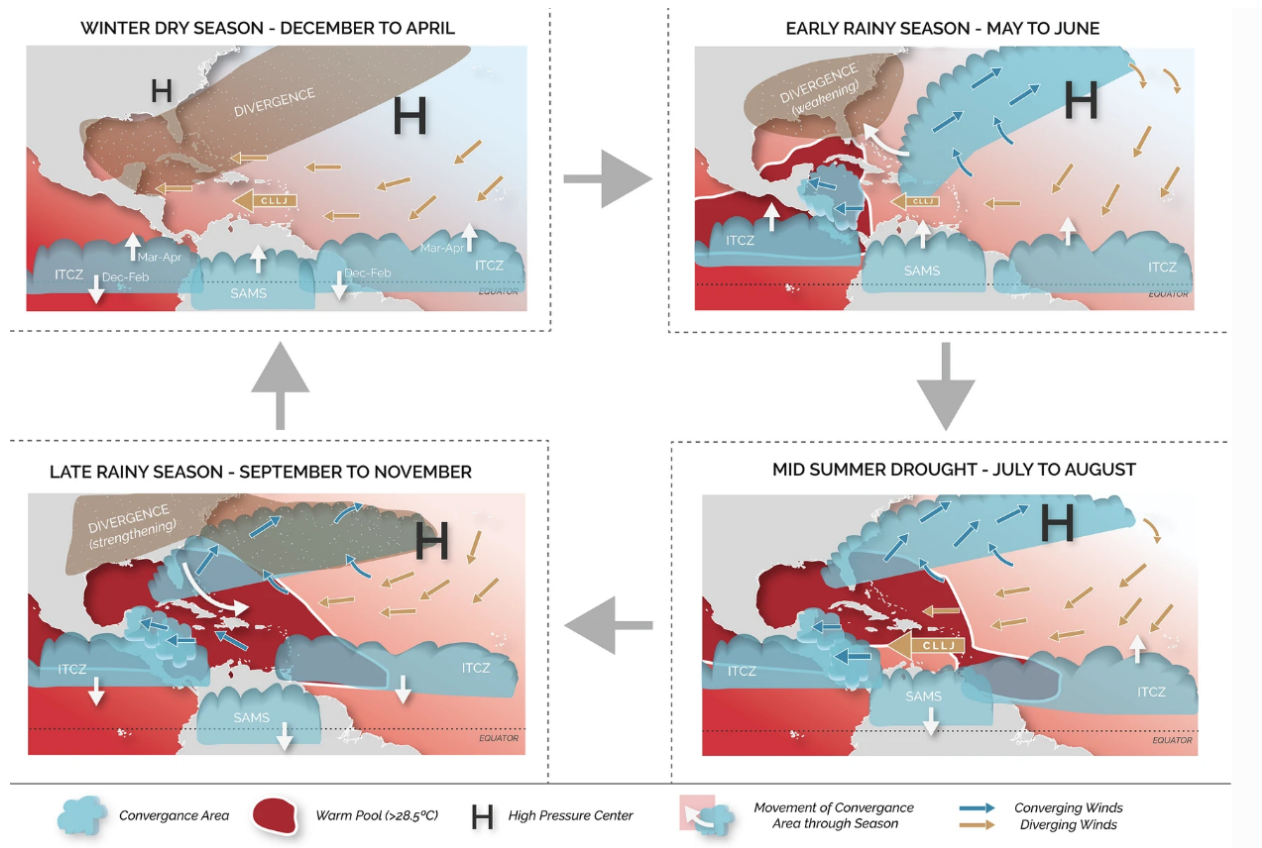


FIGURE 3.3 – Schéma des principaux facteurs qui influencent le cycle saisonnier des précipitations dans les Caraïbes (Martinez *et al.*, 2019).

La cyclogenèse tropicale dépend essentiellement de la présence d'eau chaude à la surface de la mer. Pour l'ensemble du bassin de l'Atlantique Nord, la saison des tempêtes tropicales commence en mai, atteint son apogée en septembre, puis décline, suivant généralement le réchauffement et le refroidissement saisonniers de la température de la surface de la mer. Dans les Caraïbes en revanche, on observe une distribution bimodale du nombre des cyclones, avec des pics en juin et en octobre, séparés par un minimum en juillet (Inoue *et al.*, 2002). Les cyclones tropicaux peuvent se former à partir d'interactions avec l'ITCZ (Toma & Webster, 2010) et de l'émergence de l'AWP (Wang *et al.*, 2006). Les cyclones tropicaux peuvent s'affaiblir en raison d'un grand cisaillement vertical du vent (Angeles *et al.*, 2010) et des interactions avec le CLLJ (Wang *et al.*, 2008).

La figure 3.4 présente l'ensemble des cyclones tropicaux ayant traversé les Grandes Antilles de 1850 à fin 2022 (données tirées de la base de données de la NOAA²). Cette énumération montre que la région des Grandes Antilles est traversée en moyenne par 10 à 15 tempêtes tropicales (TS) par an et environ 3-5 cyclones de catégories 1 à 4 par an. Aucun cyclone de catégorie 5 n'a été observé entre 1850 et 1910. A partir de 1910, entre 1 à 3 cyclones de catégorie 5 ont été observés. Aucune tendance n'a été observée, exceptée une augmentation des dépressions tropicales (TD) à partir de 1950.

Les cyclones tropicaux ont causé des pertes matérielles de près de 47 milliards de dollars dans les Antilles sur la période 1960-2013 (Burgess *et al.*, 2018). Ces cyclones tropicaux représentent 71% des événements hydrométéorologiques et 95% des dégâts enregistrés, ce qui en fait le risque naturel le plus important dans les Antilles, tant en termes d'occurrences que de dégâts (Burgess *et al.*, 2018).

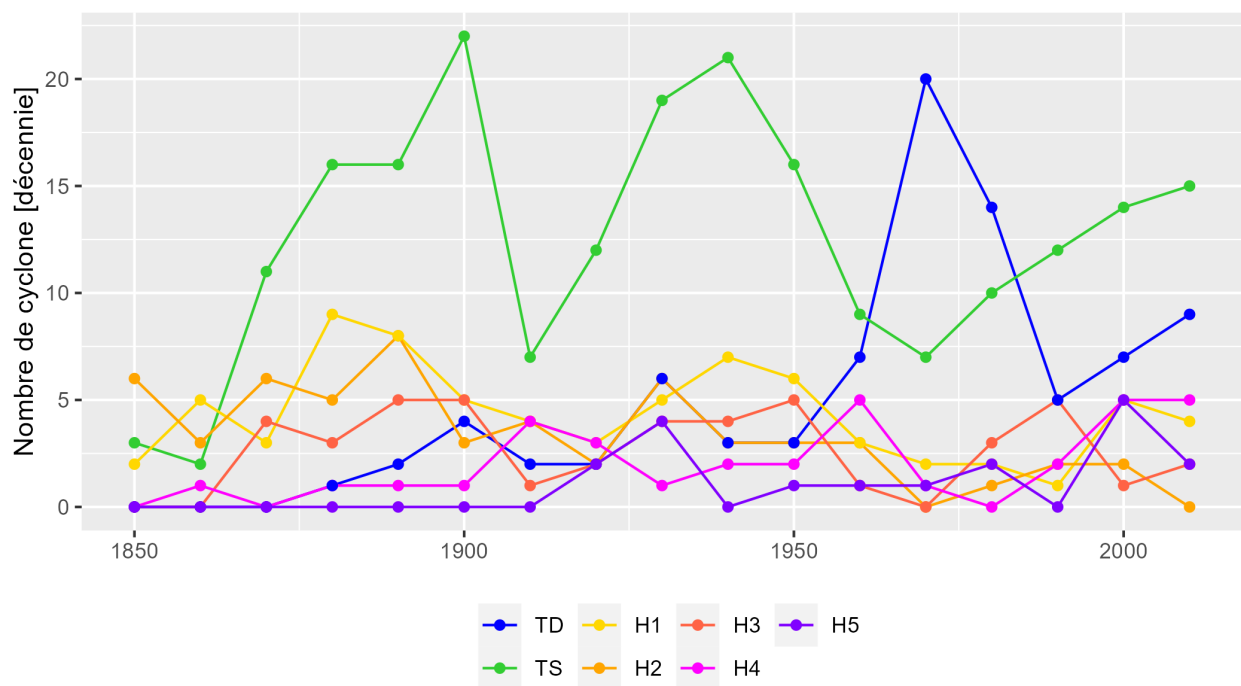


FIGURE 3.4 – Evolution des cyclones tropicaux ayant traversé le Grandes Antilles de 1850 à 2022. TD représente les dépressions tropicales et TS représente les tempêtes tropicales. H1 à H5 représentent les cyclones de catégories 1 à 5 (données tirées de la base de données de la NOAA).

2. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>

3.2.1.3 Relation entre les types de temps atmosphériques et la saisonnalité des pluies

Plusieurs études ont tenté de mettre en évidence les types de temps atmosphériques dominants en Amérique Centrale (Moron *et al.*, 2016 ; Chadee & Clarke, 2015 ; Sáenz & Durán-Quesada, 2015 ; Gourirand *et al.*, 2020) dont deux qui se sont intéressées particulièrement à la région des Caraïbes (Chadee & Clarke, 2015 ; Moron *et al.*, 2016). Chadee & Clarke (2015) ont utilisé les données de vents journaliers à 850 hPa de la réanalyse NCEP (Kanamitsu *et al.*, 2002) sur la période 1979-2010. Moron *et al.* (2016) ont utilisé les données de vent à 925 hPa de la même réanalyse NCEP et les données journalières de rayonnement de grande longueur d'onde OLR (Outgoing Longwave Radiation ; Liebmann & Smith (1996)) sur la période 1979-2013. Les deux études ont utilisé l'algorithme de partitionnement k-means (MacQueen, 1967) pour classifier la circulation atmosphérique dans la région des Caraïbes par types de temps.

Les travaux de Chadee & Clarke (2015) ont mis en évidence sept types de temps atmosphériques dans les Caraïbes, qui se distinguent principalement par l'extension et la localisation de l'anticyclone NASH. Les types de temps 1 à 5 sont très fréquents pendant la période hivernale et correspondant à la période sèche. Les types de temps 6 et 7 sont très fréquents pendant la saison pluvieuse (voir la figure 3.5). Le nombre de jours consécutifs avec le même type de temps est compris entre 2 et 3 jours pour les cinq premiers types de temps et est deux fois plus élevé pour les types de temps 6 et 7 (Chadee & Clarke, 2015). Le test de tendance non paramétrique de Mann-Kendall (Yue *et al.*, 2002) sur les fréquences annuelles de chaque type de temps a été utilisé pour tester l'hypothèse nulle d'absence de tendance sur la période 1979-2010 au niveau de confiance de 95 % (seuil de signification de 5 %). Seuls les types de temps 5 et 6 ont montré des tendances significatives. Le type de temps 5 diminue au rythme de 0.33 j/an et le type de temps 6 augmente au rythme de 0.81 j/an (Chadee & Clarke, 2015). Cependant, Chadee & Clarke (2015) n'ont donné aucune piste d'explication sur les tendances des types de temps 5 et 6.

Les travaux de Moron *et al.* (2016) ont mis en évidence huit types de temps atmosphériques dans les Caraïbes. Les principaux résultats obtenus par Moron *et al.* (2016), et présentés à la figure 3.6, montrent que 5 types de temps sont très fréquents en hiver (types de temps 1 à 3 et 7 et 8) et les trois autres sont très fréquents en été (types de temps 4 à 6). Ces derniers sont responsables de plus de 70% de la pluviométrie moyenne annuelle sur la région caribéenne. Les types de temps d'hiver se produisent d'octobre à mai, ce qui correspond à peu près à la saison sèche, et sont caractérisés par une intensité et une localisation variable de la NASH et une subsidence à grande échelle. Les types de temps d'été se produisent presque exclusivement de fin avril à début novembre ce qui correspond à la saison des pluies. Le type de temps 4 culmine en juillet, ce qui correspond à la MSD, et est caractérisé par une forte NASH et un CLLJ rapide. Les types de temps 5 et 6 sont plus fréquents entre mai-juin et août-octobre, périodes qui correspondent à peu près aux deux saisons de fortes pluies, et sont caractérisés par une subsidence réduite à l'échelle régionale et un CLLJ plus faible.

Malgré la différence entre le nombre de type de temps, les résultats de ces différents travaux semblent être cohérents. Par exemple, le type de temps 6 de Chadee & Clarke (2015) semble regrouper les types de temps 5 et 6 de Moron *et al.* (2016) et le type de temps 7 de Chadee & Clarke (2015) est similaire au type de temps 4 de Moron *et al.* (2016).

En résumé, huit types de temps atmosphériques ont été identifiés dans les Caraïbes sur la période 1979-2019. Les types de temps 1 à 3 et 7 et 8 sont très fréquents à partir de fin novembre jusqu'à fin avril, et sont associés à une intensification de l'anticyclone NASH. Les types de temps 4 à 6 sont très fréquents à partir de début mai jusqu'à fin octobre, et sont caractérisés par une diminution de l'intensité de l'anticyclone NASH.

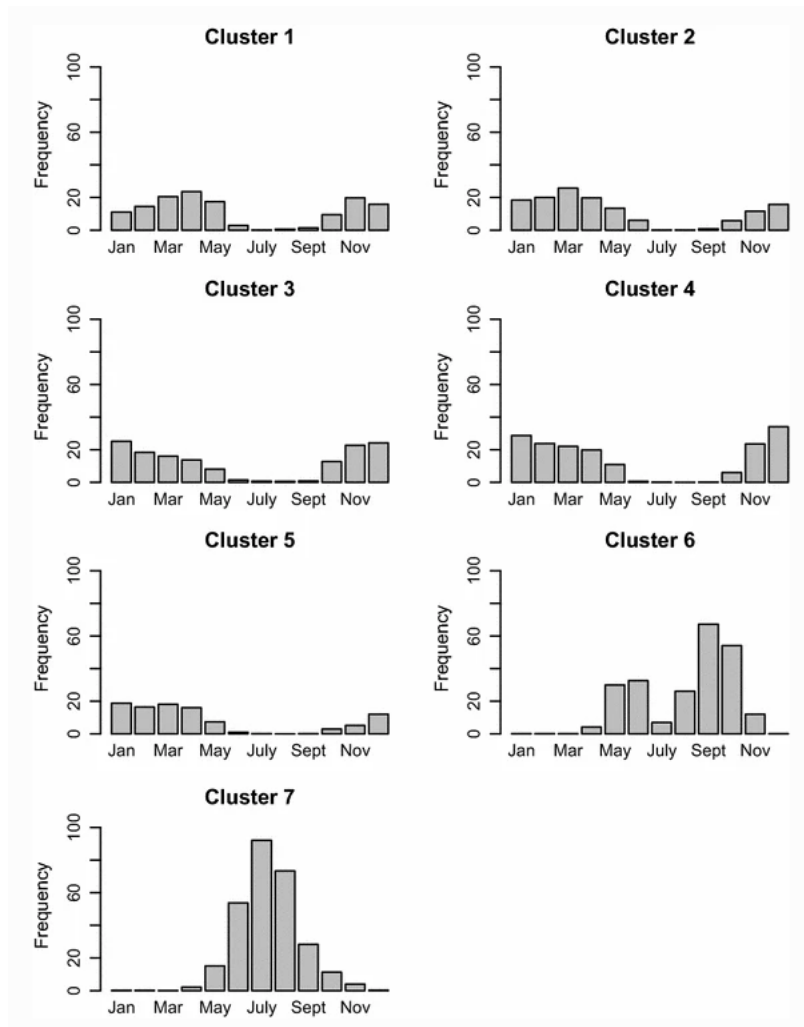


FIGURE 3.5 – Fréquences mensuelles relatives aux sept types de temps décrits par Chadee & Clarke (2015).

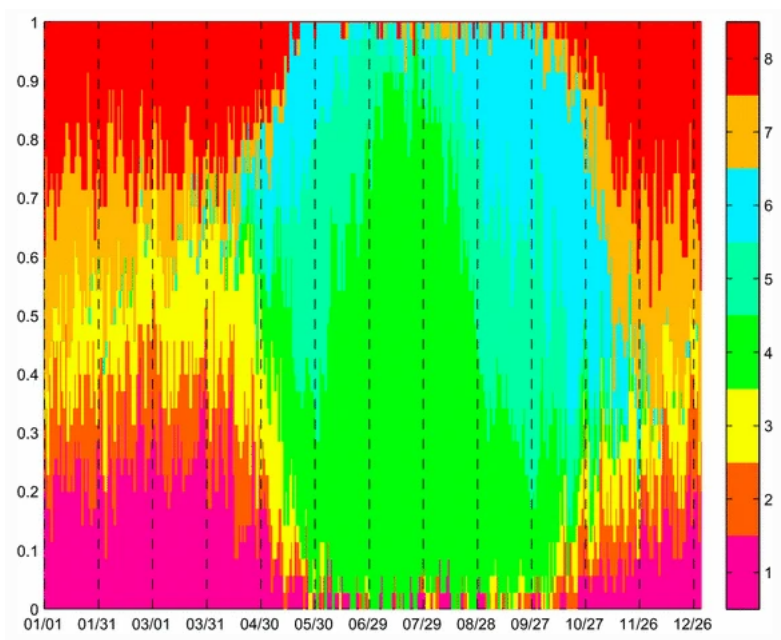


FIGURE 3.6 – Fréquences journalières relatives aux huit types de temps décrits par Moron *et al.* (2016).

3.2.1.4 Analyse des tendances des pluies dans les Antilles

Les tendances des pluies dans les Antilles ont été étudiées par Peterson *et al.* (2002) et Stephenson *et al.* (2014). Peterson *et al.* (2002) ont utilisé les données observées sur la période 1955-2000 de 30 stations réparties dans différents pays dans les Caraïbes. Les résultats de Peterson *et al.* (2002) et de Stephenson *et al.* (2014) ont montré que la pluie moyenne annuelle semble plutôt dominée par une variabilité sur les échelles annuelle à décennale et les tendances linéaires ne représentent pas bien les changements observés. Ces résultats sont cohérents à ceux présentés à la section 3.2.1.1.

3.2.2 Pluies en Haïti

Les premiers travaux sur la variabilité des précipitations en Haïti ont été réalisés par Fassig (1929) et Alpert (1941). Ces travaux ont été réalisés avec peu de données mais ont d’ores et déjà mis en évidence la forte variabilité spatiale des pluies en Haïti (voir la figure 3.7 et la figure 3.8). Des travaux plus récents et plus complets ont été réalisés avec beaucoup plus de pluviomètres par Moron *et al.* (2015) (voir la figure 3.9). Les résultats de ces trois études sont cohérents et montrent la même variabilité spatiale de la pluie moyenne annuelle. Ce sont donc les résultats de Moron *et al.* (2015) qui seront présentés dans les prochains paragraphes.

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 509 à 2434 mm en Haïti (voir la figure 3.9). Les zones les plus sèches sont la péninsule nord, la vallée de l’Artibonite, la plaine du cul de sac à Port-au-Prince. Les zones les plus humides sont la presqu’île du sud et la partie du massif du Nord située au vent. Ce fort gradient de précipitation peut être expliqué par la topographie très accidentée (voir la figure 1.2) favorisant les brises de mer et de montagne superposées aux vents d’est dominants. L’ensemble des pluviomètres utilisés a bien capturé le cycle bimodal de pluie qui caractérise la pluviométrie des Grandes Antilles. Cependant, les cumuls de pluies et les périodes où les pics de pluies ont été observés diffèrent pour plusieurs stations (voir la figure 3.10).

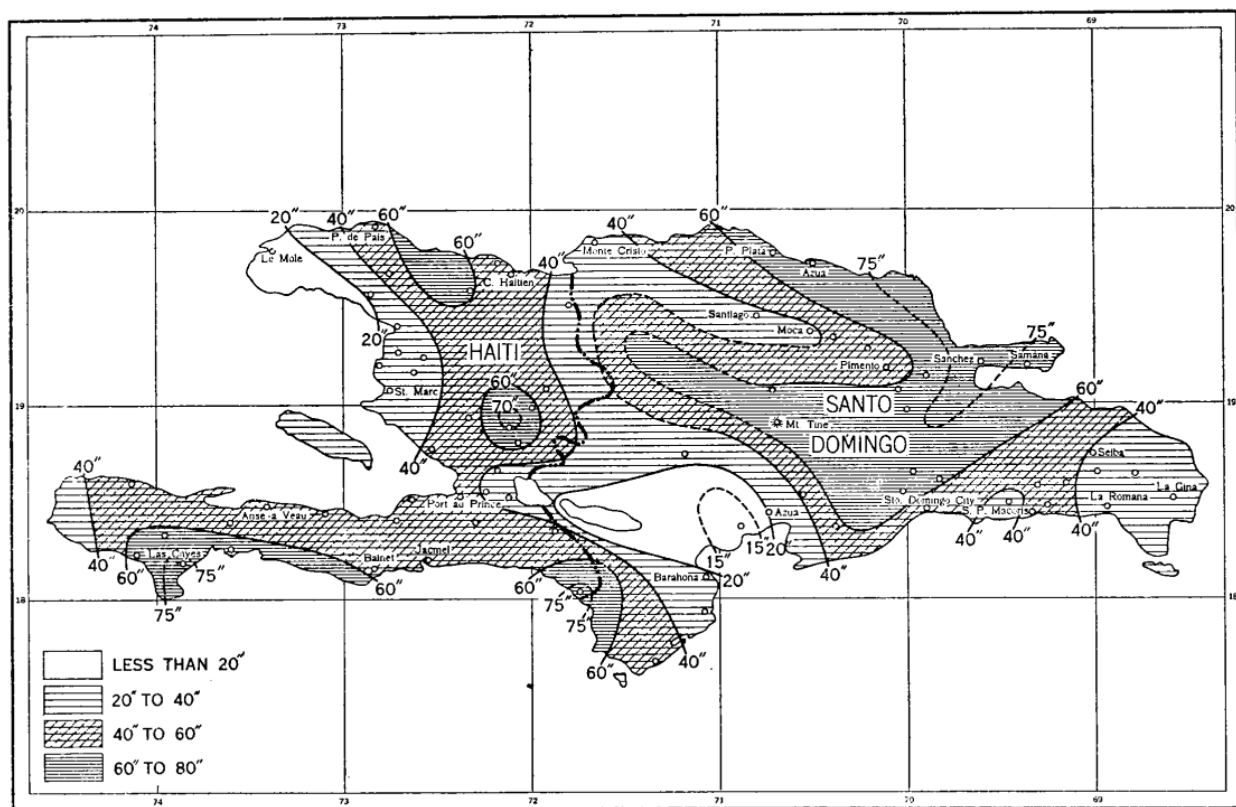


FIGURE 3.7 – Variabilité spatiale des pluies moyennes annuelles en Haïti calculée par Fassig (1929) à l’aide de 27 stations ayant des enregistrements de 10 ans ou plus et sur une période moyenne de 18 ans.

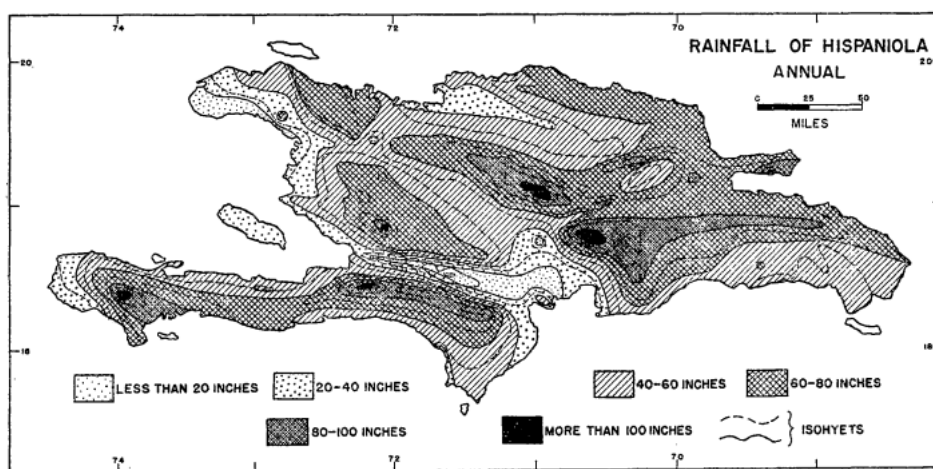


FIGURE 3.8 – Variabilité spatiale des pluies moyennes annuelles en Haïti calculée par Alpert (1941) à l’aide de 79 stations ayant des enregistrements sur une période moyenne de 18 ans.

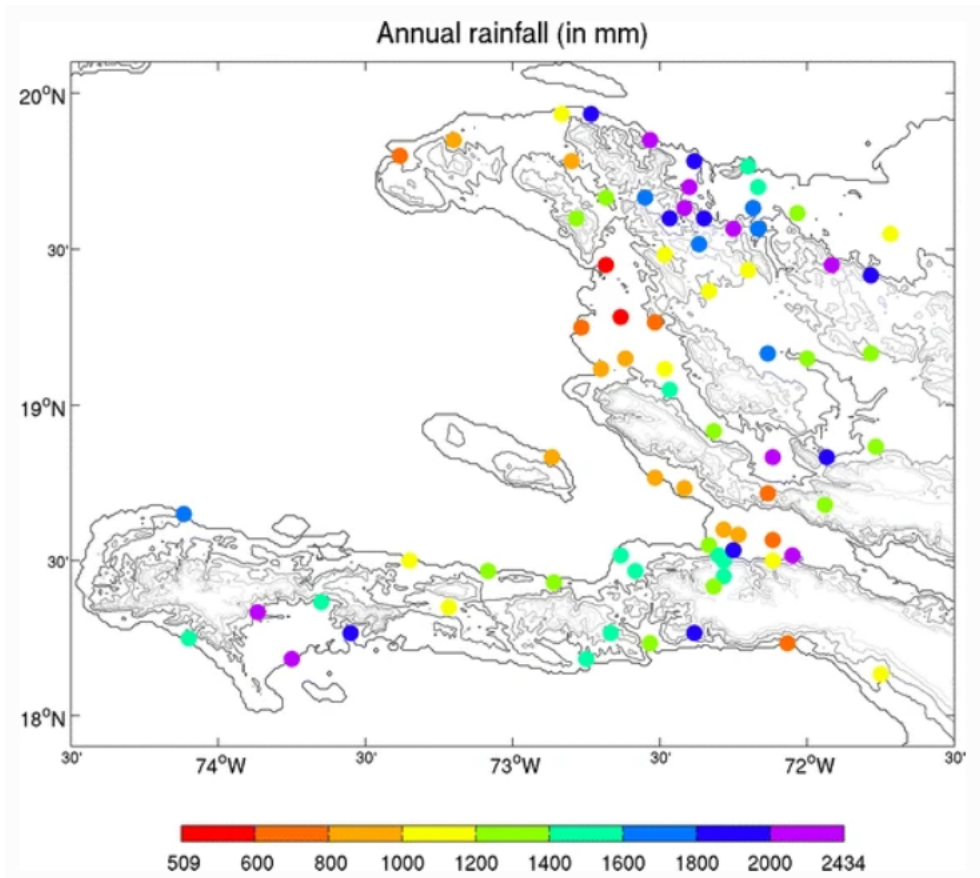


FIGURE 3.9 – Variabilité spatiale des pluies moyennes annuelles en Haïti calculée par Moron *et al.* (2015) à l'aide de 156 stations ayant des enregistrements sur la période 1905-2005.

En raison de la forte variabilité spatiale de la pluviométrie annuelle en Haïti, Moron *et al.* (2015) ont utilisé l'algorithme de partitionnement k-means (MacQueen, 1967) permettant de regrouper les pluviomètres ayant des caractéristiques communes. Ainsi, Moron *et al.* (2015) ont groupé les pluviomètres en 4 *clusters* (voir la figure 3.10). Les trois premiers *clusters* présentent des cycles annuels similaires avec deux maxima en mai et septembre-octobre séparés par la saison d'été (MSD), et un minimum absolu en décembre-mars. La différence entre ces trois *clusters* est donc liée à la pluviométrie moyenne. Le dernier *cluster* présente aussi deux pics de précipitations mais le second est plus fort que le premier, et retardé en novembre (Moron *et al.*, 2015).

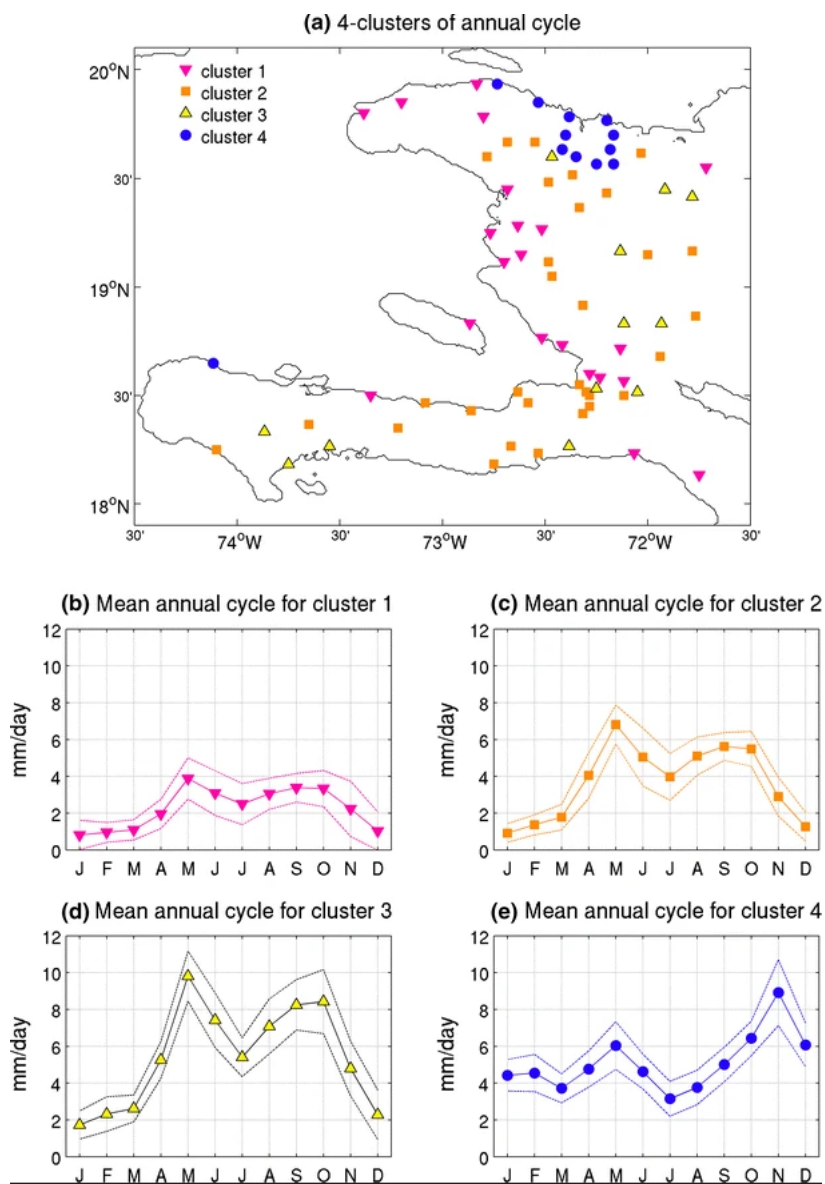


FIGURE 3.10 – Classification par Moron *et al.* (2015) des pluviomètres haïtiens ayant des caractéristiques communes, calculée avec les données sur la période 1905-2005.

Les travaux de Moron *et al.* (2015) ont aussi mis en évidence des alternances de périodes sèches et humides quasi-décennal de la pluviométrie en Haïti, et semble correspondre aux mêmes alternances identifiées à l'échelle des Grandes Antilles (voir la section 3.2.1.1). Leurs principaux résultats, présentés à la figure 3.11, mettent en évidence des anomalies (calculés par rapport à la période de référence 1922-1968) humides dans les années 1900 et 1930, au début des années 1940 et 1960, et des anomalies sèches dans les années 1910, 1920 et presque chaque année entre 1967 et 2002 (sauf 1978-1979, 1981, 1984, 1994, 1996, 1999). Les trois

dernières décennies ont été particulièrement sèches, avec des sécheresses pluriannuelles entre 1975-1977 et 1985-1993. En résumé, les pluies moyennes annuelles en Haïti semblent suivre des alternances de périodes sèches et humides durant 3 ou 7-9 ans.

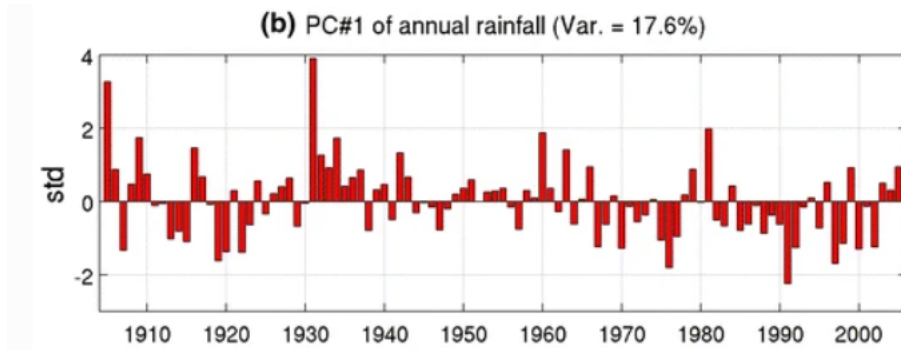


FIGURE 3.11 – Anomalie de la pluie annuelle par rapport à la période de référence 1922-1968 (Moron *et al.*, 2015).

3.3 Température de l'air dans les Antilles

3.3.1 Variabilité de la température de l'air dans les Antilles

Il n'existe pas d'étude dédiée spécifiquement à la variabilité spatiale et temporelle des températures de l'air dans les Antilles. Les études qui ont été réalisées portent sur l'analyse des tendances, lesquelles études sont présentées à la section 3.3.2. Ainsi, une analyse des températures de l'air issues de la base de données ERA-5 est présentée ci-après pour synthétiser leur variabilité sur cette région.

La figure 3.12 présente les régimes de températures de l'air et les variabilités interannuelles des températures moyennes annuelles, calculés avec les données de températures de l'air ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020), pour les quatre pays des Grandes Antilles : Cuba, Haïti, Jamaïque, Porto Rico et République Dominicaine. Pour chaque pays, la moyenne interannuelle des températures mensuelles ERA-5 a été calculée sur chaque maille recouvrant le pays, la distribution de ces valeurs est résumée par une boîte à moustaches dans la figure du haut. Les résultats montrent que les températures de l'air sont du même ordre de grandeur pour les quatre pays des Grandes Antilles. La température moyenne est d'environ 23 à 24°C en hiver et d'environ 26 à 28 en été. Les températures moyennes mensuelles sont plus ou moins variables en République Dominicaine où l'on a, pour certaines mailles ERA-5, des températures de 21 à 22°C en été.

Les variabilités des températures moyennes annuelles sont présentées dans la figure du bas (figure 3.12). Chaque point représente la moyenne des températures moyennes annuelles de l'ensemble des mailles ERA-5 de chaque pays. Les résultats montrent que la variabilité interannuelle est similaire, selon ERA-5, dans les cinq pays des Grandes Antilles : les années plus chaudes comme l'année 1998 est observée pour l'ensemble des pays. Les températures moyennes annuelles sont relativement plus faibles en République Dominicaine (~24°C) que dans les autres pays (de 24.5 à 25.5°C). Les températures de l'air moyennes annuelles semblent augmenter au cours du temps, et cette augmentation semble s'être accélérée à partir de 2010.

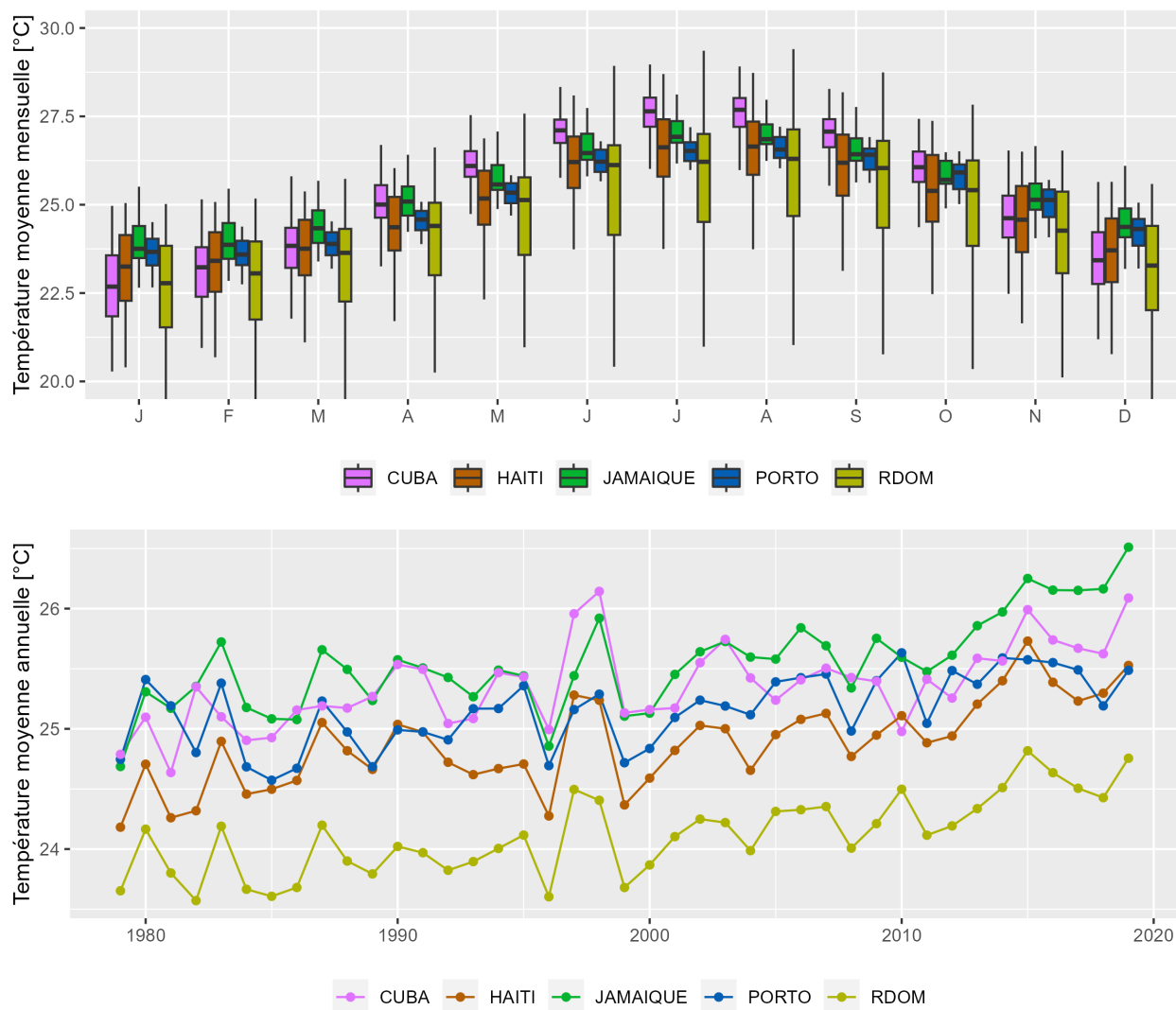


FIGURE 3.12 – (en haut) régimes des températures, sous forme de boîtes à moustaches, et (en bas) variabilité interannuelle des températures moyennes annuelles, calculés avec les données de température de l’air ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) sur la période 1980-2019. Chaque boîte à moustaches représente les températures moyennes mensuelles sur la période 1980-2019 de l’ensemble des mailles ERA-5. De gauche à droite on a : Cuba, Haïti, Jamaïque, Porto Rico et République Dominicaine.

3.3.2 Analyse des tendances des températures de l'air dans les Antilles

La première analyse régionale des tendances des températures de l'air dans les Caraïbes a été entreprise en 2001 lors d'un atelier soutenu par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Peterson *et al.*, 2002). Certains de ces résultats (basés sur 30 stations à travers la région) suggèrent qu'au cours de la période 1958-1999, il y a eu une augmentation spectaculaire du nombre de jours et de nuits très chauds, et une diminution du nombre de jours et de nuits très frais : le nombre de jours et de nuits chauds a doublé et le nombre de jours et de nuits frais a diminué de près de 30% en 40 ans (Peterson *et al.*, 2002).

Une étude plus récente et plus détaillée sur les tendances des températures extrêmes a été réalisée par Stephenson *et al.* (2014). Les résultats obtenus par Stephenson *et al.* (2014) vont dans le même sens que ceux obtenus par Peterson *et al.* (2002) : Stephenson *et al.* (2014) montrent que la fréquence des jours chauds et des nuits chaudes a augmenté tandis que moins de jours frais et de nuits fraîches ont été observés pour les deux périodes étudiées (1961-2010 et 1981-2010). Les résultats de Stephenson *et al.* (2014) ont aussi montré que la fréquence des journées chaudes et des nuits chaudes a augmenté respectivement de 3.31 et 4.07 % (environ 12 et 15 jours) par décennie, alors que la fréquence des journées fraîches et des nuits fraîches n'ont diminué que de 1.80 et 2.55 % par décennie.

3.4 Evapotranspiration potentielle (ETP) dans les Antilles

A notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée sur la variabilité spatio-temporelle de l'ETP dans les Antilles. L'ETP et de manière plus générale l'évaporation est pourtant une grandeur importante à quantifier pour l'analyse de la réponse hydrologique des bassins versants à différentes échelles temporelles. Cette section se propose donc de présenter des ordres de grandeurs de l'ETP dans les Grandes Antilles. L'ETP est calculée avec les données de température ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) et la formule d'Oudin *et al.* (2005). La méthode développée par Oudin *et al.* (2005) a été retenue pour le calcul de l'ETP pour au moins deux raisons. La première raison est la "frugalité" de cette méthode en terme de données nécessaires, puisqu'elle se base uniquement sur la température de l'air. En effet, les autres paramètres communément utilisés pour le calcul de l'ETP (vent, humidité, etc.) sont moins accessibles, ce qui justifie l'utilisation d'une formule basée uniquement sur la température dans un contexte où il y a peu de données. De plus, c'est l'une des méthodes identifiées comme les plus pertinentes pour la modélisation pluie-débit lorsqu'elle a été comparée à 27 modèles de calcul de l'évapotranspiration potentielle et testée sur plus de 300 bassins versants couvrant plusieurs zones climatiques, dont les zones tropicales (Oudin *et al.*, 2005).

La figure 3.13 présente les régimes des ETP et les variabilités interannuelles des ETP moyennes annuelles pour les quatre pays des Grandes Antilles. Comme pour les températures, la moyenne interannuelle des ETP mensuelles a été calculée sur chaque maille recouvrant le pays, la distribution de ces valeurs est résumée par une boîte à moustaches dans la figure du haut. Les résultats montrent les ETP sont du même ordre de grandeur pour les quatre pays des Grandes Antilles. L'ETP moyenne est de 90 à 110 mm/mois en hiver et 150 à 170 mm/mois en été.

Les variabilités interannuelles sont présentées dans la figure du bas (figure 3.13). Chaque point représente la moyenne des ETP annuelles de l'ensemble des mailles de chaque pays. Les résultats montrent que la variabilité des ETP est similaire à celle des températures de l'air. Les ETP moyennes annuelles sont relativement plus faibles en République Dominicaine (1500 à 1550 mm/an) que dans les autres pays (1550 à 1600 m/an). Les ETP moyennes annuelles semblent augmenter au cours du temps, et cette augmentation semble s'être accélérée à partir de 2010 : du fait de l'augmentation de la température de l'air déjà décrite dans la section 3.3.1.



FIGURE 3.13 – (en haut) régimes des ETP, sous forme de boîtes à moustaches, et (en bas) variabilités inter-annuelles des ETP moyennes annuelles, calculés avec les données de température de l’air ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) et la formule d’Oudin *et al.* (2005) sur la période 1980-2019. Chaque boîte à moustaches représente les ETP moyennes mensuelles sur la période 1980-2019 de l’ensemble des mailles ERA-5. De gauche à droite on a : Cuba, Haïti, Jamaïque, Porto Rico et République Dominicaine.

3.5 Débits dans les Antilles

Aucune étude n'a été réalisée sur la variabilité spatio-temporelle des débits dans les Antilles. Ainsi, une analyse des 40 séries de débits de Jamaïque et de Porto Rico (voir la section 2.5) est présentée ci-après pour synthétiser leur variabilité.

La figure 3.14 présente les régimes des débits et les variabilités interannuelles des débits moyens annuels, calculés avec les 40 stations de débits (20 en Jamaïque et 20 à Porto Rico) sur la période 1979-2017. Pour chaque pays, la moyenne interannuelle des débits mensuels été calculée sur chaque série de débits, la distribution de ces valeurs est résumée par une boîte à moustaches dans la figure du haut. Les résultats obtenus montrent que les débits sont du même ordre de grandeur pour les séries de débits des deux pays. Comme pour les pluies, les débits ont un régime bimodal avec deux pics de débits : le premier pendant l'ERS (mai-juin) et le second pendant la LRS (septembre à novembre) avec des valeurs entre 50 et 200 mm/mois. Les mois de décembre à avril sont caractérisés par une période de faibles débits où les valeurs sont inférieurs à 50 mm/mois à Porto Rico et 100 mm/mois en Jamaïque.

Les variabilités des débits moyens annuels sont présentées dans la figure du bas (figure 3.14). Chaque point représente la moyenne des débits de l'ensemble des séries disponibles de chaque pays. Les résultats obtenus montrent que les débits semblent être plus élevés en Jamaïque, notamment entre 1986 et 1996. De plus, les débits semblent être plus élevés à partir de 2005, notamment à Porto Rico. Un pic de débit est observé à Porto Rico en 2017, ce pic est probablement lié aux crues générées par le cyclone Maria (voir la section 3.6).

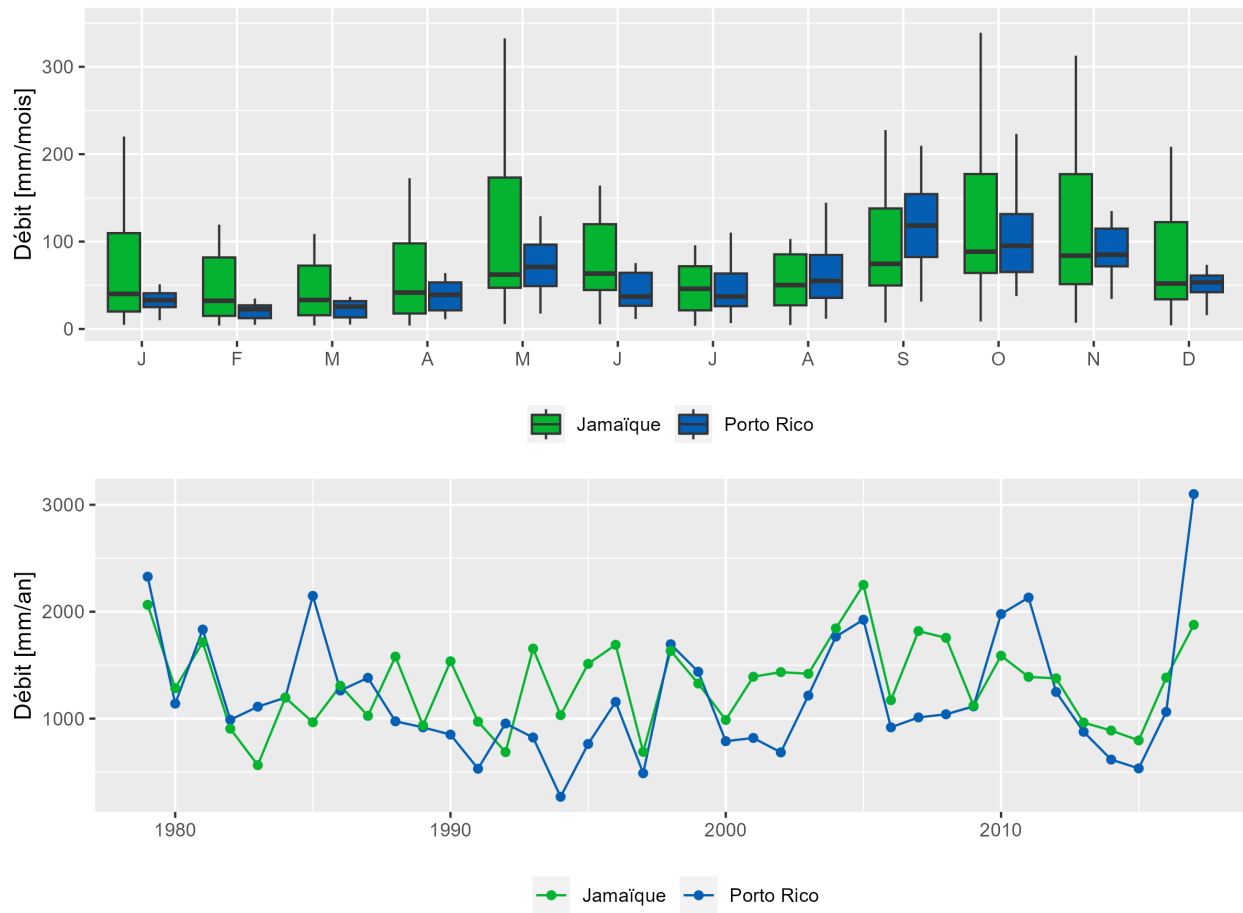


FIGURE 3.14 – (en haut) Régimes des débits, sous forme de boîtes à moustaches, et (en bas) variabilités interannuelles des débits moyens annuels, calculés avec les 20 séries de débits à Porto Rico et les 20 séries de débits en Jamaïque disponibles sur la période 1979-2017.

3.6 Pluies et crues fortes dans les Antilles

En raison du manque de données de pluies continues sur le long terme dans les Antilles, peu d'études ont analysé les pluies et crues fortes dans cette région. Les quelques études disponibles ont été réalisées essentiellement à Cuba, en Jamaïque et à Porto Rico et parfois en République Dominicaine. De ce fait, cette section présente des ordres de grandeur des pluies et crues fortes dans les pays pour lesquels les études sont disponibles. Ces pluies fortes sont souvent réparties en deux catégories : celles liées aux cyclones et les fortes pluies non cycloniques.

La figure 3.15 présente les maximum des cumuls de pluies associés à 61 cyclones ayant traversés Porto Rico sur la période 1899-2017 (les données utilisées proviennent des travaux de Ramos-Scharrón & Arima (2019)). Cette figure montre que 50% des cyclones sont caractérisés par des cumuls de pluies entre 200 et 500 mm, et 25% ont des cumuls de pluies supérieurs à 500 mm. La figure 3.15 montrent également que les cumuls de pluies semblent diminuer à partir de 1975, mais que la fréquence des cyclones a augmenté à partir de cette date. Le cumul de pluie le plus élevé (976 mm) est associé à une dépression tropicale en 1970 (Ramos-Scharrón & Arima, 2019). Le cumul de pluie associé au cyclone Maria, qui a causé 64 morts à Porto Rico en 2017 (Kishore *et al.*, 2018), est de 733 mm (Ramos-Scharrón & Arima, 2019). Les 10 cyclones associés aux cumuls de pluies les plus élevés ont causé la mort d'une centaine de personnes et des pertes matérielles s'élevant à plusieurs milliards de dollars (Hernández Ayala & Matyas, 2016).

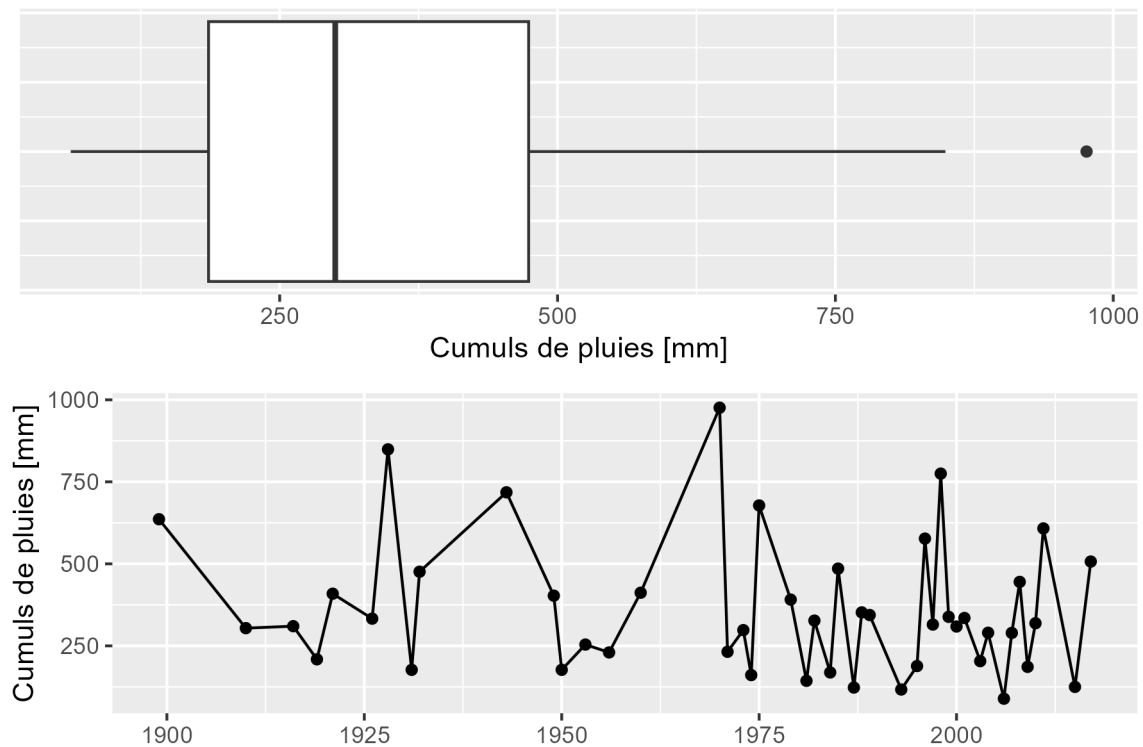


FIGURE 3.15 – Maximum des cumuls de pluies associés à 61 cyclones ayant traversés Porto Rico sur la période 1899-2017. Les données utilisées proviennent des travaux de Ramos-Scharrón & Arima (2019).

Ramos-Scharrón *et al.* (2021) a réalisé un catalogue de débits de pointe avec 1922 valeurs provenant de 167 stations de jaugeage de cours d'eau de Porto Rico pour 41 cyclones sur la période 1899-2020. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de débits de pointe les plus élevées enregistrées à Porto Rico sont du même ordre de grandeur que des débits de pointe mondiaux (voir la figure 3.16). Un total de 20 débits de pointe (entre 10.5 à $47.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) induites par les pluies fortes de huit cyclones se situent dans l'intervalle de confiance 95% de l'enveloppe des débits de pointe mondiaux. Parmi ces huit cyclones, la dépression tropicale

en 1970, les cyclones Georges (1998) et Maria (2017) ont généré des débits de pointes exceptionnels (Ramos-Scharrón *et al.*, 2021).

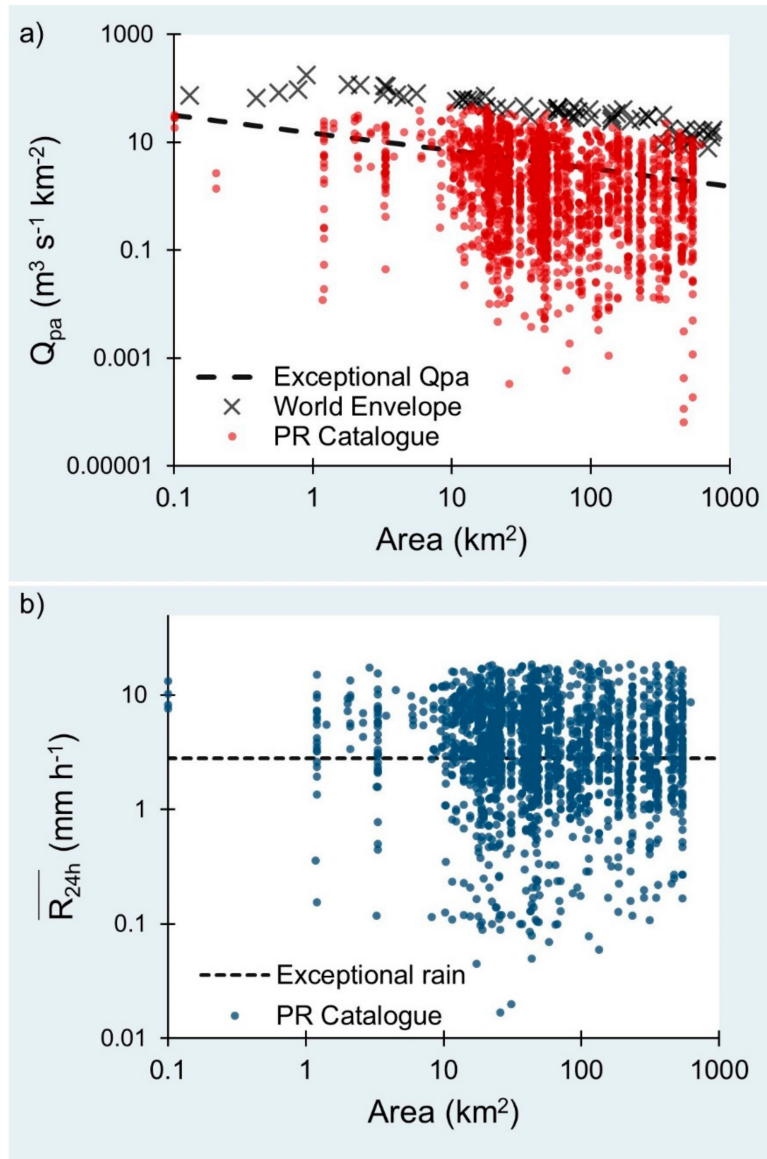


FIGURE 3.16 – (a) Relation entre les débits de pointe spécifiques et les superficies des bassins versants à Porto Rico pour 1922 valeurs mesurées sur 167 stations. (b) Relation entre l'intensité moyenne de pluie journalière des fortes pluies associées et les superficies des bassins versants (Ramos-Scharrón *et al.*, 2021).

Plus de 1100 épisodes de pluies (en période cyclone et hors cyclone) pour lesquels les cumuls journaliers sont supérieurs à 100 mm ont été identifiés à Cuba entre 1930 et 1970 (Arenas, 1983b). Plus de 75% de ces épisodes de pluies fortes ont été observé en avril et mai et entre août et octobre. Arenas (1983b) a aussi identifié des épisodes de pluies associés à six cyclones à Cuba entre 1926 à 1982 pour lesquels les cumuls journaliers sont compris entre 500 et 744 mm. Arenas (1983a) a identifié une dizaine d'épisodes de pluies fortes dans les Caraïbes, dont quatre à Cuba (voir le tableau 3.1). Les cumuls journaliers de ces épisodes sont, pour la plupart, supérieurs à 500 mm, et peuvent atteindre plus de 1000 mm comme c'est le cas en Jamaïque en 1960.

Les fortes pluies de 1963 et de 1982 à Cuba ont généré des fortes crues sur huit bassins versants dont les superficies sont comprises entre 62 et 1050 km² (Arenas, 1983a). Les débits de pointe associés à ces crues sont entre 1390 et 5500 m³ s⁻¹, qui représentent plus de 500 fois les débits moyens annuels (voir le tableau 3.2). Les fortes pluies de 1979 en République Dominicaine ont aussi généré des fortes crues sur quatre bassins versants ayant des superficies comprises entre 400 et 2700 km². Les débits de pointe associés à ces crues en République Dominicaine sont entre 1400 et 5100 m³ s⁻¹ (voir le tableau 3.2), qui représentent plus de 200 fois les débits moyens annuels (Arenas, 1983a).

TABLEAU 3.1 – Liste non exhaustive des pluies fortes dans les Caraïbes (Arenas, 1983a).

Pays	Année	Cumul de pluie [mm]	Durée [h]
Barbade	1901	762	24
	1970	584	24
Cuba	1926	510	16
	1963	730	24
	1981	331	8
	1982	775	24
Grenade	1976	506	24
Jamaïque	1960	1118	24
République Dominicaine	1979	813	24
Sainte Lucie	1967	229	2

TABLEAU 3.2 – Liste non exhaustive des crues fortes dans les Caraïbes (Arenas, 1983a). Qmax représente les débits de pointe et Qmean représente les débits moyens annuels.

Pays	Année	Superficie [km ²]	Qmax [m ³ s ⁻¹]	Qmean [m ³ s ⁻¹]
Cuba	1963	1050	5500	10.2
	1963	506	2200	3.9
	1963	325	2160	6.8
	1963	73	2060	2.6
	1982	62	1800	1.8
	1982	114	1660	2.6
	1982	502	1396	12.2
République Dominicaine	1979	620	5081	17.6
	1979	2663	3407	18.9
	1979	799	2324	19.8
	1979	402	1402	3.6

Un épisode de pluies fortes a été identifié par Laing (2004) en Jamaïque les 3 et 4 janvier 1998. Six pluviomètres en Jamaïque ont enregistré des cumuls entre 170 et 425 mm pendant ces 2 jours. Ces pluies fortes ont généré des crues dont les débits de pointe estimés entre 18 et 65 m³ s⁻¹ (supérieurs à la crue centennale sur certains bassins versants) sur des petits bassins versants (1 à 6 km²). Laing (2004) a aussi identifié un épisode de

pluies fortes les 5 et 6 janvier 1992 à Porto Rico, pour lequel les cumuls de pluies sont entre 200 et 300 mm, et supérieurs à 500 mm pour certaines stations. Ces fortes pluies ont généré des fortes crues sur plusieurs bassins versants (Torres-Sierra, 1996), principalement le bassin versant de *Rio Grande de Patillas near Patillas* (47 km²) pour lequel de débit de pointe est estimé à 880 m³ s⁻¹ (supérieur à la crue centennale).

3.7 Hydrologie des bassins versants haïtiens

Peu d'études scientifiques ont été réalisées sur l'hydrologie des bassins versants haïtiens, par manque de données disponibles. Les seules études documentées sur l'hydrologie en Haïti ont été réalisées dans le cadre du projet BVH³ (Bassin Versant Haïtien). Le projet BVH est la réponse à une commande du CIAT (Comité Interministériel de l'Aménagement) en 2012, et a été financé par l'AECID⁴ (Agence internationale de coopération espagnole pour le développement) et dirigé par Cédric Gaucherel. L'objectif de ce projet BVH était d'apporter une meilleure compréhension de l'hydrologie en Haïti pour une meilleure gestion des ressources en eaux.

Les principales données hydro-climatiques utilisées dans le cadre de BVH sont les séries de débits journaliers exploitables uniquement sur la période 1920-1940 et plusieurs séries de pluies mensuelles disponibles sur la période 1905-2005. Ces données ont été exploitées dans le but d'étudier le comportement des bassins versants haïtiens. Les études réalisées dans le cadre de ce projet ont utilisé des outils statistiques de classification (dendrogramme et analyse en composante principale) pour faire ressortir d'éventuels comportements communs des bassins versants haïtiens. Ce projet peut être décrit en quatre grandes étapes :

1. classer les bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques géomorphologiques,
2. classer les bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques hydrologiques,
3. étudier la variabilité infra-annuelle et interannuelle de la pluviométrie en Haïti à partir de 156 séries de pluies mensuelles disponibles sur la période 1905-2005,
4. étudier d'éventuels liens entre les comportements géomorphologiques, hydrologiques et climatiques des bassins versants étudiés.

La troisième étape du projet BVH a consisté à constituer une seule base de données de pluies mensuelles cohérente sur tout Haïti (Moron *et al.*, 2015) à partir des différentes bases de données utilisées et à étudier la variabilité spatio-temporelle des pluies en Haïti. Ce travail a déjà été résumé à la section 3.2.2. Ainsi, seules les étapes 1, 2 et 4 sont présentés en détail dans les sections suivantes, le travail sur la variabilité infra-annuelle et interannuelle de la pluviométrie en Haïti est seulement rappelé.

La variabilité infra-annuelle et interannuelle de la pluviométrie en Haïti a été étudiée par Moron *et al.* (2015) à partir de 156 séries de pluies mensuelles disponibles sur la période 1905-2005. Les résultats obtenus par Moron *et al.* (2015) ont mis en évidence une forte variabilité spatiale de pluie annuelle avec des pluies relativement élevées dans le sud-ouest (autour de 2000 mm/an), et des pluies relativement faibles dans le nord-ouest (autour de 500 mm/an). Les résultats ont aussi mis en évidence le cycle bimodal de pluies en Haïti, et aussi une alternance de période sèche et humide pendant le XX^e siècle (voir la section 3.2.2).

3.7.1 Classification géomorphologique des bassins versants haïtiens

Cette étude avait pour objectif de classer les bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques géomorphologiques. Les données utilisées ont été :

1. le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ASTER GDEM V2 de 30 m de résolution (Tachikawa *et al.*, 2011),
2. une couche vectorielle contenant le tracé des rivières principales et secondaires d'Haïti, issue de la numérisation d'une ancienne carte topographique à l'échelle 1:50000,

3. <https://agroforesterie-bassinsversants.ht/Presentation-du-projet-BVH>

4. <https://www.aecid.ht/fr/>

3. une couche vectorielle d'occupation du sol (1998) en Haïti.

Trois classes de vitesses de ruissellement ont été définies de manière qualitative (“rapide”, “moyenne” et “faible”) en fonction des classes d'occupation de sol. Ainsi :

1. une vitesse de ruissellement “rapide” a été associée aux sols nus et zones urbaines,
2. une vitesse d'écoulement “moyenne” a été associée à des zones de savanes,
3. une vitesse d'écoulement “faible” est associée à des zones végétalisées,

Les contours de 75 bassins versants ont été définis à partir du MNT. Ensuite, cinq indices ont été définis par bassin versant :

1. l'altitude maximale du bassin versant,
2. l'altitude médiane du bassin versant,
3. la pente médiane du bassin versant,
4. la classe d'occupation du sol la plus fréquente définissant ainsi, de manière qualitative, la vitesse de ruissellement (“rapide”, “moyenne” ou “faible”),
5. l'élongation du bassin versant qui est le ratio entre le diamètre d'un cercle de superficie équivalente à celle du bassin versant et la distance maximale entre deux points du bassin versant.

La méthode d'analyse de données multivariées ACP (analyse en composante principale, Hotelling, 1992) a été utilisée pour étudier les indices qui sont corrélés, et par la suite regrouper les bassins versants pour former des classes ayant des caractéristiques communes (Bonhomme *et al.*, 2013; Gaucherel *et al.*, 2017). Ainsi, quatre classes de bassins versants ont été définies par Gaucherel *et al.* (2016) (voir la figure 3.17) :

1. G1 : bassins versants allongés (en plaine ou en altitude),
2. G2 : bassins versants à “faible” vitesse d'écoulement avec des réseaux hydrographiques sinueux,
3. G3 : bassins versants montagneux avec beaucoup d'affluents,
4. G4 : bassins versants en zone plate et à écoulement rapide.

Les bassins versants allongés et/ou montagneux (classes G1 et G3) sont situés dans la presqu'île du Sud et le nord-ouest d'Haïti. Les bassins versants à vitesses de ruissellement “faibles” (G2) sont situés dans le nord-est. Les bassins versants en zone plate et à écoulement rapide sont situés essentiellement dans le nord-est.

3.7.2 Classification hydrologique des bassins versants haïtiens

Cette partie du projet BVH avait pour objectif de classer les bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques hydrologiques. Les données utilisées dans cette partie sont 70 séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940.

Les séries de débits ayant au moins cinq ans de données sans lacunes (26 parmi les 70) ont été sélectionnées et utilisées dans le suite de l'étude. Ensuite, sept indices ont été définis à partir des séries de débits sélectionnées :

1. médiane des débits journaliers,
2. minimum des débits journaliers,
3. coefficient de variation des débits journaliers,
4. indice de faible débit : ratio entre la moyenne des sept valeurs les plus basses de l'année et le débit moyen annuel,
5. indice de fort débit : ratio entre la moyenne des sept valeurs les plus élevées de l'année et le débit moyen annuel,
6. nombre de jours pour lesquels les débits journaliers sont supérieurs à trois fois le débit médian,
7. nombre de jours pour lesquels les débits journaliers sont inférieurs à 5% du débit médian.

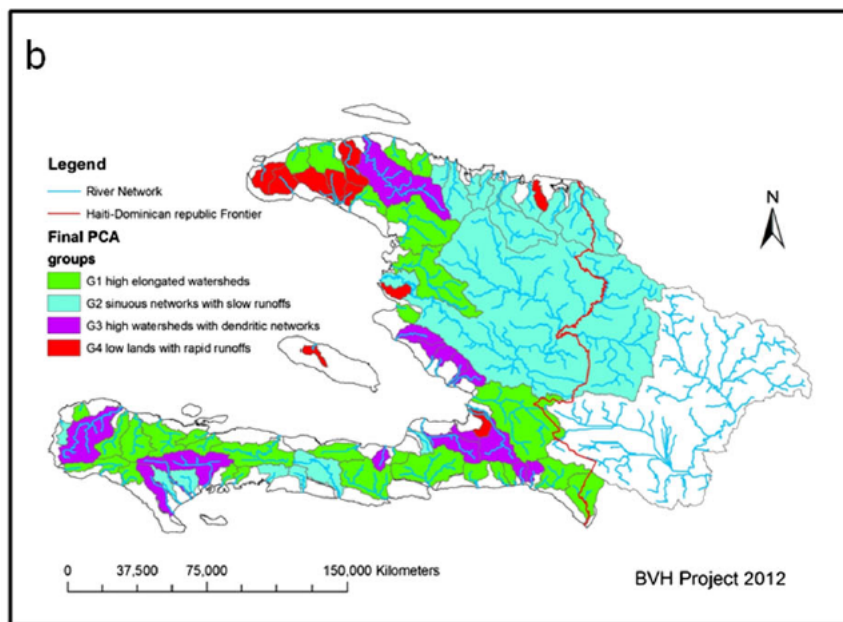


FIGURE 3.17 – Classification des bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques géomorphologiques. Quatre classes ont été définies par Gaucherel *et al.* (2017). La classe G1 est formée par les bassins versants allongés (en plaine ou en altitude). La classe G2 est formée par les bassins versants à faible vitesse d’écoulement avec des réseaux hydrographiques sinueux. La classe G3 est formée par les bassins versants montagneux avec beaucoup d’affluent. La classe G4 est formée par les bassins versants en zone plate et à écoulement rapide.

La saisonnalité des débits moyens mensuels a été analysée afin de voir si les débits présentaient un comportement “cyclique”. Ensuite, la méthode d’analyse de données multivariées ACP (Hotelling, 1992 ; Pearson, 1901) a été utilisée pour étudier d’éventuelles corrélations entre ces indices, et par la suite regrouper les bassins versants pour former des classes ayant des caractéristiques communes. Ainsi, trois classes de bassins versants ont ainsi été définies par Gaucherel *et al.* (2016) (voir la figure 3.18) :

1. H1 : des bassins versants “stables”, c’est-à-dire des bassins versants ayant des pics de débits peu élevés,
2. H2 : des bassins versants “périodiques”, c’est-à-dire des bassins versants ayant des régimes de débits quasi-cycliques,
3. H3 : des bassins versants “instables”, c’est-à-dire des bassins versants ayant à la fois des pics de débits très élevés et des périodes sèches très marquées.

Les bassins versants “stables” sont situés, pour la plupart dans le sud d’Haïti. Les bassins versants “périodiques” sont situés, pour la plupart, sur la façade ouest (nord-ouest de Port-au-Prince). Les bassins versants “instables” sont situés, pour la plupart dans le nord-est.

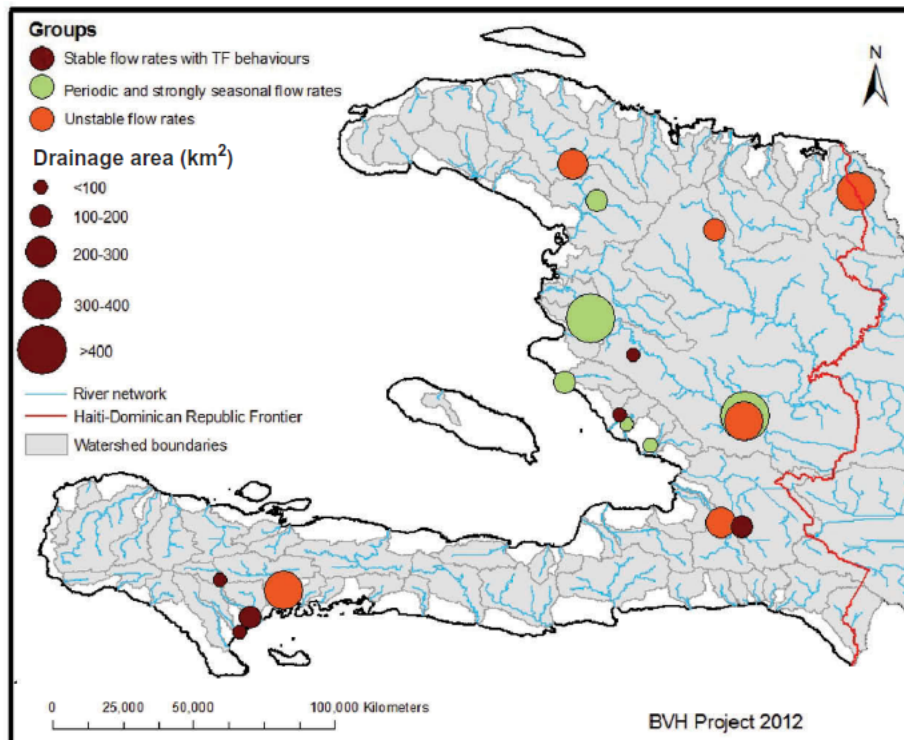


FIGURE 3.18 – Classification des bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques hydrologiques. Trois classes ont été définies par Gaucherel *et al.* (2017) : les bassins versants “stables”, “périodiques” et “instables”.

3.7.3 Synthèse de l’hydrologie en Haïti

L’objectif de cette dernière partie du projet BVH consistait à étudier d’éventuels liens entre les comportements géomorphologiques, hydrologiques et climatologiques des bassins versants haïtiens. Les données utilisées dans cette partie sont :

1. les quatre classes de bassins versants ayant des caractéristiques géomorphologiques communes (voir section 3.7.1),
2. les trois classes de bassins versants ayant des caractéristiques hydrologiques communes (voir section 3.7.2),
3. les 156 séries de pluies mensuelles construites par Moron *et al.* (2015).

Les pluies des bassins versants ont été calculées comme étant une moyenne des pluviomètres à l’intérieur des bassins versants. Ensuite, six indices climatiques ont été définis par bassin versant :

1. pluie moyenne annuelle,
2. écart-type des pluies annuelles,
3. pluie moyenne des mois de décembre, de janvier et de février,
4. pluie moyenne des mois d’avril, de mai et de juin,
5. pluie moyenne en juillet,
6. pluie moyenne en août, septembre, octobre et novembre.

La méthode d’analyse de données multivariées ACP (Hotelling, 1992 ; Pearson, 1901) a été ensuite utilisée pour étudier d’éventuelles corrélations entre ces indices climatiques, et par la suite regrouper les bassins versants pour former des classes ayant des caractéristiques climatiques communes. Ainsi, trois classes de bassins versants ont ainsi été définies par Gaucherel *et al.* (2018) :

1. C1 : des bassins versants avec des pluies annuelles relativement élevées,
2. C2 : des bassins versants avec des pluies relativement élevées en été (juin et juillet),
3. C3 : des bassins versants avec des pluies annuelles relativement faibles.

D'éventuels relations entre les classes géomorphologiques, hydrologiques et climatiques des bassins versants définies précédemment ont été étudiées en comparant les classes deux à deux (géomorphologie-hydrologie, hydrologie-climatologie, géomorphologie-climatologie) puis, en utilisant la méthode statistique de regroupement hiérarchique (Defays, 1977), reposant sur des diagrammes arborescents.

Les résultats obtenus par Gaucherel *et al.* (2018) ont montré qu'ils n'existent pas de relation nette entre les comportements des bassins versants. Une relation significative entre la géomorphologie et la climatologie seulement a été observée. Les bassins versants montagneux reçoivent une quantité totale de précipitations annuelles plus élevée. À l'inverse, les bassins versants avec d'importantes zones de plaine et des cours d'eau sinueux reçoivent moins de pluie. Une corrélation faible mais significative a également été trouvée entre l'hydrologie et la climatologie. En effet, les bassins versants ayant des indices de débits de base élevés sont, pour la plupart, des bassins versants recevant de fortes précipitations. Aucune relation systématique n'a été observée entre la géomorphologie et l'hydrologie. Deux relations plus subtiles et non systématiques ont également été détectées : i) les bassins versants ayant des débits élevés sont souvent des bassins versants montagneux et ii) les bassins versants de basse altitude et sinueux sont souvent liés à des bassins versants ayant des débits moyens à faibles. Ainsi, les auteurs ont pu grouper les bassins versants haïtiens suivants 4 catégories (voir la figure 3.19) :

1. F1 : les bassins versants montagneux à débits élevés,
2. F2 : les bassins versants ayant des pluies et débits moyens,
3. F3 : les bassins versants en plaine et à débits variables,
4. F4 : les bassins versants ayant une faible pluviométrie.

Les bassins versants montagneux à débits élevés sont situés dans la presqu'île du Sud et au nord-ouest de Port-au-Prince. Les bassins versants avec des pluies et débits moyens (F2) sont situés au nord et au sud de Port-au-Prince. Les bassins versants en plaine et à débits variables sont situés dans le nord et le sud-ouest d'Haïti. Les bassins versants recevant une faible pluviométrie sont situés sur la façade ouest d'Haïti (nord-ouest de port-au-Prince).

Les études réalisées dans le cadre du projet BVH ont permis de constituer une base de données de pluies mensuelles sur Haïti, et de classifier les bassins versants haïtiens suivant leurs caractéristiques géomorphologiques, hydrologiques et climatologiques à l'aide de plusieurs descripteurs statistiques, ce qui a permis de faire une première caractérisation des bassins versants haïtiens. Cependant, les auteurs du projet BVH mentionne que la période de disponibilité des données constitue une limite importante, car ces données sont disponibles, pour la plupart, sur une période historique (1920-1940). De ce fait, les résultats obtenus peuvent ne pas être pertinents à l'époque actuelle. Ainsi, ces auteurs proposent, dans la mesure du possible, de remettre les anciennes stations en activité dans le but de comparer les données actuelles aux données historiques. De plus, ils proposent de faire aussi une analyse fréquentielle des pluies et des débits à partir des données. En plus des recommandations des auteurs, une perspective pertinente pourrait être de croiser les données de pluies et de débits disponibles par modélisation pluie-débit dans le but d'étudier les comportements hydrologiques des bassins versants haïtiens.

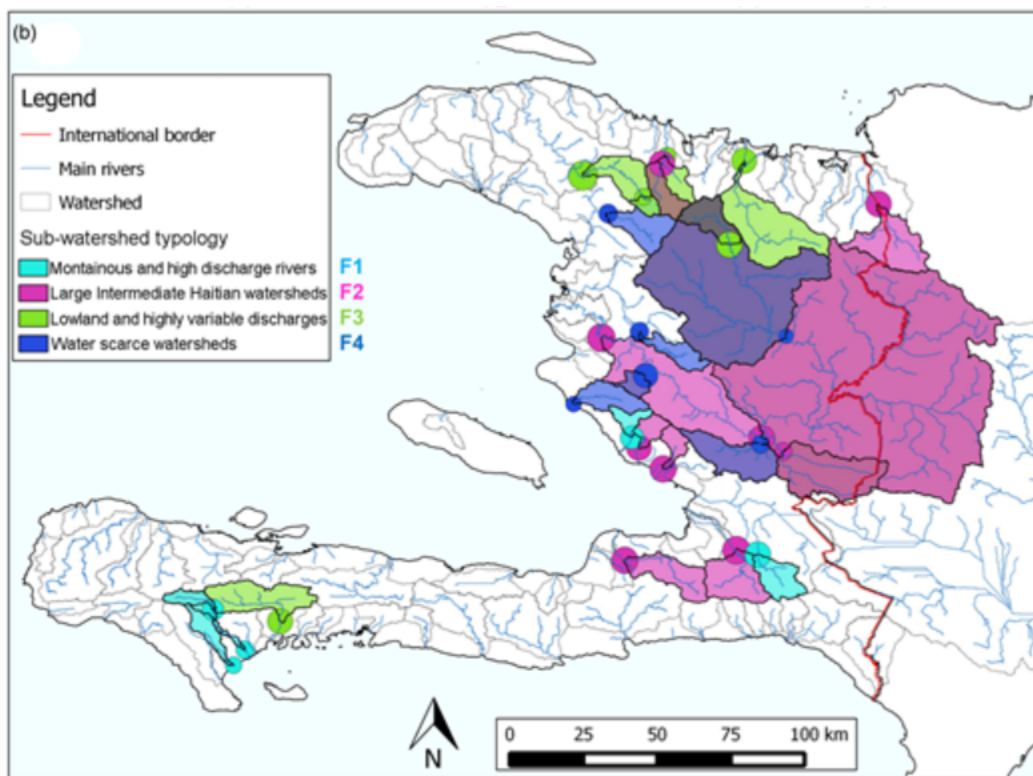


FIGURE 3.19 – Classification des bassins versants haïtiens (Gaucherel *et al.*, 2018). Les bassins versants montagneux à débits élevés en verts foncés. Les grands bassins versants ayant des pluies et débits moyens en violets. Les bassins versants en plaine et à débits variables en verts clairs. Les bassins versants ayant une faible pluviométrie en bleus.

3.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de faire un état de l'art des connaissances sur la pluie, de la température de l'air, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits à la fois dans les Antilles et en Haïti lorsque c'est possible. Le régime, la variabilité interannuelle ainsi que les facteurs atmosphériques qui influencent la pluviométrie dans les Antilles et les types de temps atmosphériques ont été présentés. Enfin, les études réalisées sur l'hydrologie en Haïti ont été résumées.

Les études présentées ont montré que le régime de pluie dans les Antilles est divisé en quatre saisons : deux saisons de fortes pluies (ERS et LRS), une saison sèche (WDS) et une saison de transition (MSD) entre les deux saisons de pluies. Cette variabilité de la pluviométrie infra-annuelle semble être influencée par l'anticyclone NASH et la bande tropicale de convection ITCZ. La variabilité interannuelle de la pluviométrie dans les Antilles semble suivre des alternances de périodes sèches et humides au cours du XX^e, qui semblent être modulées par les oscillations d'El Niño et de l'Atlantique Nord. Des pluies fortes sont très fréquentes dans la région des Antilles, principalement en période cyclonique, et peuvent atteindre des cumuls journaliers équivalents à deux ou trois fois la pluie mensuelle. Ces pluies fortes peuvent générer des crues ayant des débits de pointe supérieurs à plus de 500 fois les débits moyens annuels. La pluviométrie haïtienne ne dénote pas spécifiquement de celle régionale, et présente donc les mêmes principales caractéristiques des pluies antillaises. Néanmoins, une forte variabilité spatiale de la pluie est observée, qui semble être influencée par la topographie d'Haïti.

Les régimes hydrologiques dans les Antilles étant de type pluvial, les régimes des débits suivent donc les mêmes saisonnalités que celles des pluies, avec deux saisons de forts débits en mai-juin et entre septembre et novembre (entre 100 et 200 mm/mois) et une saison de faibles débits autour de 50 mm/mois.

La réanalyse ERA-5 montre que les températures de l'air sont autour de 27°C en été et autour de 22°C en hiver. Plusieurs études ont montré que la température de l'air augmente linéairement au cours du temps. Une augmentation du nombre de jours et de nuits chaud, et une diminution du nombre de jours et de nuits frais ont été observés. L'ETP suit la même variabilité spatio-temporelle que la température de l'air.

Les seules études sur l'hydrologie d'Haïti ont été réalisées dans le cadre du projet BHV (Bassin versant Haïtien). L'objectif principal de ce projet était d'apporter une meilleure compréhension de l'hydrologie en Haïti pour une meilleure gestion des ressources en eaux. Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de constituer une base de données de pluies mensuelles sur la période 1905-2005. Cette base de données de pluies mensuelles ainsi que des séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940 ont été utilisées pour classer les bassins versants suivant leurs caractéristiques climatologiques, hydrologiques et géomorphologiques. Les résultats obtenus dans le cadre du projet BVH ont permis de regrouper les bassins versants suivants quatre classes :

1. les bassins versants montagneux à débits élevés,
2. les bassins versants ayants des pluies et débits moyens,
3. les bassins versants en plaine et à débits variables,
4. les bassins versants ayant une faible pluviométrie.

Les bassins versants montagneux à débits élevés, situés dans la presqu'île du Sud et au nord-ouest de Port-au-Prince. Les bassins versants avec des pluies et débits moyens, situés au nord et au sud de Port-au-Prince. Les bassins versants en plaine et à débits variables, situés dans le nord et le sud-ouest d'Haïti. Les bassins versants recevant une faible pluviométrie, situés sur la façade ouest d'Haïti (nord-ouest de port-au-Prince). Cette étude constitue une première référence concernant l'hydrologie en Haïti. Cependant, les données de pluies et de débits ont été étudiées séparément et n'ont pas été croisées, par exemple par modélisation pluie-débit. De plus, aucune analyse fréquentielle de pluie et de débit n'a été réalisée permettant d'estimer des valeurs de pluies et de débits pour plusieurs période de retour. Ces études sont des perspectives intéressantes, et permettraient une meilleure compréhension de l'hydrologie en Haïti et peuvent présenter un intérêt pour une communauté plus large, notamment pour la conception des ouvrages hydrauliques.

Première partie

**Analyse de l'hydrologie haïtienne
entre 1920 et 1940**

Chapitre 4

Création d'une base de données hydro-climatique historique en Haïti

4.1 Objectifs de ce chapitre

Ce chapitre propose de présenter les données et la méthode utilisée pour constituer une base de données hydro-climatiques en Haïti à partir des données disponibles. Dans un premier temps, les données utilisées dans le cadre du projet BHV ont été rassemblées : i) les 70 séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940 et ii) les 156 séries de pluies mensuelles (disponibles sur la période 1905-2005) construites par Moron *et al.* (2015). Ensuite, plusieurs archives papiers regroupant des données de pluies et de températures ont été rassemblées. Parmi les données disponibles sous cette forme, une numérisation de données jugées prioritaires (car concomitante avec les données de débits disponibles) a été réalisée.

Les données hydrologiques (débits) et climatiques (températures et pluies) ainsi rassemblées ont été croisées par modélisation pluie-débit à l'aide de deux modèles conceptuels globaux (GR2M Mouelhi *et al.*, 2006 ; et GR4J Perrin *et al.*, 2003) dans le but de simuler des séries de débits continues sur la période d'étude (1920-1940). Afin de compléter la caractérisation des bassins versants réalisée dans le cadre du projet BVH, 48 autres indices (différents de ceux utilisés dans BVH) couvrant 6 classes d'attributs topographique, géologique, hydrogéologique, d'occupation de sol, climatique et hydrologique ont été calculés pour caractériser les 24 bassins versants étudiés.

L'ensemble des séries hydrométéorologiques observées et simulées ainsi que les 48 indices et signatures hydrologiques constituent la première base de données hydrométéorologiques disponibles en libre accès en Haïti (Bathelemy *et al.*, 2023a, b). L'ensemble de ce travail est présenté dans les sections suivantes.

4.2 Collecte des données hydro-climatiques disponibles

Les données hydro-climatiques disponibles sur Haïti sont :

1. les 70 séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940,
2. la base de données de pluies mensuelles construites par Moron *et al.* (2015) à partir de 165 séries de pluies mensuelles disponibles sur la période 1905-2005 (voir la section 2.2.1.1),
3. des archives papiers réparties principalement entre deux institutions : la Bibliothèque Haïtienne des Spiritains (BHS) du Petit-Séminaire Collège St-Martial et l'Unité Hydro-Météorologique d'Haïti (UHM).

L'UHM dispose d'une grande salle d'archive ayant des données climatiques (pluie, température de l'air, pression atmosphérique, etc.) et hydrologiques (débit, jaugeage, hauteur d'eau, etc.) et sont disponibles sur

plusieurs formats (données tabulées, graphiques, etc). Malheureusement, aucun inventaire de ces données n'avait été réalisé (en 2020, lors de notre prise de contact avec l'UHM) et nous n'avons aucune idée du nombre de stations disponibles, de la période de disponibilité de ces données et de leur continuité dans le temps. La figure 4.1 donne un aperçu de la salle d'archive de l'UHM (à gauche) et quelques bulletins hydrographiques et météorologiques de la BHS (à droite). L'exploitation de ces données nécessitera donc une planification sur le long terme et dépasse largement le cadre de notre travail. Les données de l'UHM n'ont donc pas été exploitées dans la thèse.

Les données de la BHS comprennent des registres papiers ayant des données de pluies journalières sur le XX^e siècle pour plus de 90 stations, des bulletins annuels ayant des données de débits journaliers pour 70 stations, dont 26 ont été exploitées dans le cadre du projet BVH (voir la section 3.7) et des températures mensuelles de plus de 20 stations sur la période 1920-1940.



FIGURE 4.1 – A gauche : photo de la salle d'archives de l'UHM prise par Pierre Brigode en janvier 2019. A droite : photo de la salle d'archives de la BHS prise par Ralph Bathelemy en décembre 2021.

4.3 Numérisation des archives de la BHS

4.3.1 Organisation du travail

Une convention définissant le travail de numérisation des archives papiers a été signée en avril 2022, entre l'Université d'Etat d'Haïti (UEH) et la BHS. La BHS a mis à notre disposition une équipe expérimentée et possédant déjà un savoir faire dans la numérisation des archives papiers et un scanner adapté pour la numérisation des archives. Ce travail de numérisation a été réalisé en deux phases.

Dans la première phase, l'ensemble des archives disponibles (14 registres de données climatiques de 1888 à 1969 et des bulletins hydrographiques de 1920 à 1940) ont été photographiées et sauvegardées au format JPEG et PDF. Cette première phase a été réalisée dans les locaux de la BHS avec l'aide de leur équipe et de deux étudiants de l'UEH. Cette phase est importante dans la mesure où elle permet de sécuriser ces données. En effet, plusieurs documents d'archives papiers de la BHS ont été perdus lors du séisme de 12 janvier 2010. De plus, les registres de données sont vieux de plus d'un siècle et sont donc fragiles. Ceci est donc un bon moyen de garantir la sauvegarde et la pérennisation de ces données.

La deuxième phase de cette numérisation a consisté à rendre les données exploitables, c'est à dire de les mettre dans un format Excel ou csv par exemple. Plusieurs outils de reconnaissance optique de caractères ont été testés dans le but d'automatiser une partie de ce travail. Malheureusement, les résultats obtenus n'étaient pas

convaincants, notamment à cause d'une mauvaise lisibilité de ces documents (documents séculaires et écrits à la main). La figure 4.2 donne un aperçu de la qualité de ces documents. De ce fait, la saisie des données a été réalisée manuellement. Pour cela, 20 étudiants de l'UEH ont été sélectionnés pour la saisie des données, mais les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants. En effet, la comparaison des données numérisées aux archives papiers a révélé de nombreuses différences. De ce fait, la stratégie de numérisation a été repensée et reprise avec quatre étudiants. Ces quatre étudiants ont travaillé en binôme : un fait la lecture et l'autre la saisie. Les archives papiers sont composées de 14 registres ayant essentiellement des données de pluies journalières de 1888 à 1956 puis de 1962 à 1969. Le nombre de stations par registre varie de 14 à 97. La saisie de l'ensemble de ces données se révèle être un travail fastidieux et demanderait beaucoup de temps et un budget très important. Ainsi, ce travail de numérisation a été réalisé avec un sous-ensemble de données, jugées prioritaires. Les données jugées prioritaires sont celles qui sont disponibles sur la même période que les données de débits, ce qui permettra de les croiser par modélisation pluie-débit. Seules les données de pluies journalières et de températures de l'air mensuelles disponibles sur la période 1920-1940 (période de disponibilité des données de débits) ont été saisies et sont désormais disponibles dans un format exploitable (csv). Les données numérisées représentent 25% environ de l'ensemble des données scannées. En raison des troubles socio-politiques qu'a connu Haïti pendant la saisie des données, les quatre étudiants de l'UEH ont été épaulés par trois étudiants de l'Université Côte d'Azur (UCA). Ainsi, les quatre étudiants de l'UEH ont saisi les données de pluies journalières et les trois étudiants de l'UCA ont saisi 23 séries de températures de l'air mensuelles disponibles sur la période 1920-1940.

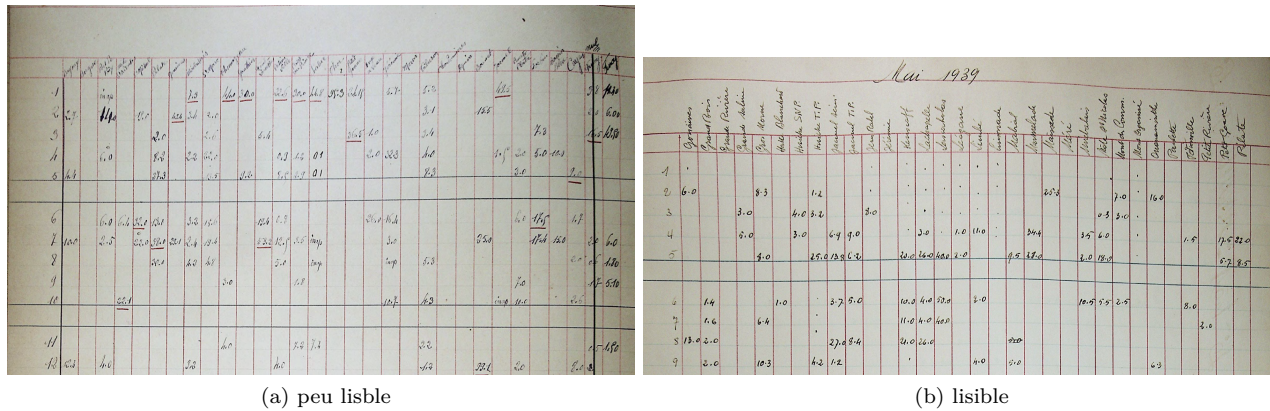


FIGURE 4.2 – Exemples d'un document peu lisible à gauche et d'un document avec une meilleure lisibilité à droite. Photo prise par Ralph Bathelemy en septembre 2023.

4.3.2 Vérification de la numérisation

La base de données mensuelles construite par Moron *et al.* (2015) a été l'aboutissement d'un premier travail de numérisation des cumuls mensuels de ces mêmes pluviomètres. Notre travail de numérisation est une prolongation du travail de Moron *et al.* (2015), car porte sur la numérisation de pluie au pas de temps journalier. Dans le but de valider la qualité des séries de pluies journalières numérisées (qui seront dénommées BHS dans la suite), leurs cumuls ont été comparés à la base de données de Moron *et al.* (2015) (qui sera dénommée MORON par la suite). Trois critères ont été utilisés pour comparer les cumuls mensuels BHS aux données MORON :

1. r qui représente le coefficient de corrélation entre les données BHS et MORON.
2. a qui représente le pourcentage des données BHS et MORON égaux à 5% près.
3. b qui représente le pourcentage de mois ayant des données pour MORON et sans données pour BHS (le pourcentage de données théorique qu'il reste à numériser).

Les données BHS ont été (re)vérifiées et corrigées pour chaque mois pour lesquels les données BHS et MORON se sont révélées différentes. Il est important de noter que dans certains cas, les données BHS ont été bien

saisies et les erreurs étaient liées aux données MORON. Ainsi, ce travail a permis de corriger à la fois les données BHS et les données MORON. Plusieurs raisons peuvent expliquer les erreurs dans les données de MORON dont trois sont décrites ci-dessous :

1. Les données de certaines stations ayant des noms similaires, et qui sont souvent très éloignées, ont parfois été confondues (Saint Louis du Nord et Saint Louis du Sud, Verrettes et Fond Verrettes par exemple).
2. Certaines valeurs extrêmes ont été volontairement modifiées dans les données de MORON en pensant que ces fortes valeurs de pluies étaient des erreurs de saisies. Par exemple, il a réellement plu 1196.9 mm en octobre 1933 à Camp-Perrin (ville dans le sud d'Haïti) tandis qu'on trouve 196.9 mm dans les données MORON.
3. Les données des stations localisées dans une même ville ont parfois été "mêlées". En fait, les pluviomètres étaient historiquement gérés uniquement par l'observatoire du Petit Séminaire Collège St Martial et les stations portaient le nom de la ville où elles étaient localisées. A partir de 1928, les Travaux Publics ont commencé à installer des stations, parfois dans les mêmes villes que les stations de l'observatoire, en ajoutant l'initiale "TP" au nom de la ville pour nommer leurs stations. Malheureusement, cette nomenclature n'est pas uniforme dans tous les registres (parfois on ajoute l'initiale "TP", parfois on ne l'ajoute pas, parfois on ajoute l'initiale "SEM" ou "OBS" pour les données de l'observatoire) et conduit à une confusion qui favorise un mélange des données de plusieurs stations dans une même ville. Pour éviter cette confusion, seules les stations de l'observatoire ont été utilisées, d'autant plus que ce sont les données continues les plus longues.

En résumé, ce travail a permis :

1. de numériser 59 stations ayant de longues séries des données journalières (au moins 10 ans de données pour la plupart) pour la période 1920-1940.
2. de numériser 23 séries de températures de l'air mensuelles pour la période 1926-1939.
3. de corriger les données mensuelles MORON pour la période 1920-1940.

4.4 Simbi : base de données hydro-climatique historique et signatures hydrologiques de 24 bassins versants haïtiens

L'ensemble des données rassemblées (données numérisées, données MORON et données de débits journaliers) a été croisé et analysé conjointement, notamment par modélisation hydrologique, dans le but d'étudier les relations entre les variables climatiques (pluies et débits) et hydrologiques (débits) des bassins versants haïtiens. Les modèles pluie-débit conceptuels GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) ont été utilisés pour simuler des séries de débits continus à l'échelle mensuelle et journalière sur la période 1920-1940, permettant ainsi d'avoir des séries climatiques (pluies, températures) et hydrologiques (débits) sans lacunes sur la période d'étude. Ces données hydro-climatiques ainsi constituées et couplées aux données topographiques, géologiques, hydrogéologiques et d'occupation de sol (disponibles en libre accès ¹) ont permis de caractériser 24 bassins versants haïtiens à partir de 6 classes d'attributs :

- a. 13 attributs topographiques (coefficient de Gravelius, pente moyenne, courbe hypsométrique, etc.)
- b. 4 attributs géologiques (pourcentage du bassin versant couvert par différente classe géologique, pourcentage des roches carbonatées, etc.)
- c. 1 attribut hydrogéologique (pourcentage du bassin versant couvert par différente classe d'aquifère)
- d. 2 attributs d'occupation de sol (pourcentage du bassin versant couvert par différente classe d'occupation de sol en 1995 et en 1998)
- e. 12 attributs climatiques (coefficient d'aridité, pluie et température moyenne, quantiles 5% et 95% etc.)

1. <https://haitidata.org/>, consulté le 16 octobre 2023.

- f. 16 attributs hydrologiques (coefficient de ruissellement, indice de débit de base, fréquence et durée des forts débits, etc.)

Les données observées et simulées et les attributs des bassins versants forment la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a) disponible en libre accès. Cette base de données comprend :

1. l'ensemble des données observées (pluies mensuelles produites par Moron *et al.* (2015), pluies journalières numérisées, températures de l'air numérisées et débits journaliers),
2. les données estimées à l'échelle des bassins versants (pluies, températures et évapotranspirations potentielles calculées avec la formule d'Oudin *et al.*, 2005),
3. les données simulées (débits journaliers à partir de GR4J et débits mensuels à partir de GR2M),
4. les contours des 24 bassins versants étudiés,
5. l'ensemble des 48 attributs de bassins versants.

La méthodologie utilisée pour la construction de Simbi est présentée dans la suite de ce chapitre sous la forme d'un article soumis en octobre 2023 à la revue scientifique ESSD² (Earth System Science Data) et actuellement en révision (Bathelemy *et al.*, 2023b).

4.5 Introduction

Hydroclimatic databases, generally composed of climatic (precipitation and air temperature) and hydrological (streamflow) time series at the catchment scale, are extremely useful (Tramblay *et al.*, 2021). They are used for water resources planning and management as well as for monitoring and forecasting floods, droughts, and changes in surface and groundwater resources (Dewandel *et al.*, 2003; Dewandel *et al.*, 2004; Alfieri *et al.*, 2020; Harrigan *et al.*, 2020). These databases are also used to evaluate the performance of “new” hydro-meteorological products based on Earth observation satellites, which are increasingly applied in poorly instrumented regions (Beck *et al.*, 2019; Brocca *et al.*, 2019; Prakash, 2019; Bathelemy *et al.*, 2022). Furthermore, they are central to studies of climate change impact, for example, through the calibration and evaluation of hydrological models used to quantify climate change impacts on water resources (Abbaspour *et al.*, 2009; Chokkavarapu & Mandla, 2019; Teutschbein & Seibert, 2012).

In recent years, hydroclimatic databases called “CAMELS” (catchment attributes and meteorology for large-sample studies) have been created in several countries : United States (Addor *et al.*, 2017), Chile (Alvarez-Garreton *et al.*, 2018), Brazil (Chagas *et al.*, 2020), Great Britain (Coxon *et al.*, 2020), Australia (Fowler *et al.*, 2021), Central Europe (Klingler *et al.*, 2021), and Switzerland (Höge *et al.*, 2023). The CAMELS databases use large datasets (precipitation, streamflow, air temperature, etc.) from multiple sources (in situ, reanalysis, remote sensing, etc.) over several hundreds of catchments. They also include multiple catchment attributes covering a range of topographic, climatic, hydrological, geological, and land use variables, etc. While the CAMELS databases provide time series, other databases provide indices and hydroclimatic signatures of catchments, such as the African Database of Hydrometric Indices (ADHI; Tramblay *et al.* (2021)). The main objective of these works is to make hydroclimatic data freely and easily available to the scientific community.

Unfortunately, there are significant differences between countries in terms of the quality and quantity of hydroclimatic reference databases, as well as regarding access to these data. Some countries do not have such reference databases. This is the case of Haiti, whose territory is, nevertheless, highly exposed to natural disasters (Khouakhi *et al.*, 2017; Burgess *et al.*, 2018), and which will, moreover, tend to increase due to climate change (Peterson *et al.*, 2002). At the same time, Haiti is facing the consequences of massive deforestation and anarchic urbanization in recent decades (Hedges *et al.*, 2018; Tarter *et al.*, 2018; Mompremier *et al.*, 2022), resulting in increased vulnerability to hydroclimatic hazards. Currently, there is no freely and easily accessible hydroclimatic database in Haiti. The only existing data are the 156 monthly rainfall series (1905–2005) compiled by Moron *et al.* (2015), the 70 daily streamflow series (1920–1940) from the BVH project (Bassins versants haïtien in French, i.e., Haitian catchments; Gaucherel *et al.* (2018)), paper archives

2. <https://www.earth-system-science-data.net/>, consulté le 16 octobre 2023.

in several institutions, and data collected as part of different projects, often available for very short periods. This BVH project includes the characterization of Haitian catchments using streamflow data (Gaucherel *et al.*, 2016) and rainfall data (Moron *et al.*, 2015). The BVH has also investigated existing relationships between catchment shape, relief, and river sinuosity (Gaucherel *et al.*, 2017; Bonhomme *et al.*, 2013). These two databases (rainfall and streamflow data) are not known to the public, have never been cross-referenced to form a hydroclimatic database for the analysis of Haitian catchments, and remain largely underused to date.

The main goal of this study is to cross-reference and analyze these different databases in order to propose the first hydroclimatic database for several Haitian catchments. Nevertheless, most of the available historical Haitian streamflow series have gaps and are therefore limited in their application. One way to obtain continuous streamflow series is to use a hydrological model, fed by climatic time series, to reconstruct the missing values (Brigode *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2019). This method has been used for several decades for various types of catchments covering different climatic regions (Caillouet *et al.*, 2017; Crooks & Kay, 2015; Jones & Lister, 1998). Thus, monthly (GR2M, Mouelhi *et al.* (2006)) and daily (GR4J, Perrin *et al.* (2003)) lumped rainfall–runoff models were used to reconstruct continuous streamflow series in Haiti at both time steps.

The goal of our work is therefore threefold :

1. producing climatic (air temperature and rainfall) series at the catchment scale by spatially and temporally aggregating available series,
2. creating a continuous Haitian hydroclimatic database for the 1920–1940 period, using the catchment climatic series and the rainfall–runoff models,
3. characterizing the hydrological behavior of Haitian catchments based on 48 hydrological indices and signatures covering six classes of catchment attributes (topographic, geological, hydrogeological, land use, climate indices, and hydrological signatures).

Observed hydroclimatic data, simulated streamflow series, and calculated catchment attributes make up the Simbi database, the first continuous and freely available hydrological database in Haiti. Simbi is a guardian of rivers, freshwater, and rain in Haitian mythology <https://en.wikipedia.org/wiki/Simbi>.

4.6 Data used

4.6.1 Streamflow

The streamflow data consist of 70 daily series, most of which are available from 1920 to 1940, with significant gaps in some series. These data were collected by the *Hydrographic Department of the Irrigation Service of the General Direction of Public Works* in Haiti. On average, 12 gauging measurements were acquired per station and per year. These data were initially available in paper form in annual hydrographic bulletins. In the 1980s, a private company (LGL génie conseil) digitized these bulletins for the Haitian government. These data have not yet been used by the scientific community.

4.6.2 Rainfall

4.6.2.1 Monthly rainfall

A modified version of the monthly rainfall database compiled by Moron *et al.* (2015) was used in this study. The modifications to the original database are described in detail in Appendix A.2.1. The original data produced by Moron *et al.* (2015) included 156 monthly rainfall series available from 1905 to 2005 and were derived from three different sources :

1. The CNIGS (National Center for Geospatial Information) database with 162 monthly rainfall series ;
2. The database managed by the international company Chemonics (<https://chemonics.com/>, accessed 06/02/2023) with 109 monthly rainfall series ;

3. The CNSA (National Coordination for Food Security) database with 14 monthly rainfall series.

These three databases were merged by Moron *et al.* (2015) by removing and/or correcting duplicates. In total, 156 monthly rainfall series were validated and retained to form the monthly rainfall database. However, several series have a high percentage of missing data, and most of them have data available only from 1930 to 1970.

4.6.2.2 Daily rainfall

Several daily rainfall series were collected by the observatory of the Petit-Séminaire Collège St-Martial (PSCSM) in Port-au-Prince during the 20th century. These data were available in paper archives of the Haitian Spiritual Library (BHS for *Bibliothèque Haïtienne des Spiritains*) in Port-au-Prince. Overall, 59 of these series with data for the period 1920–1940 have been digitized for the Simbi database.

4.6.2.3 NOAA 20CR reanalysis rainfall

The third version of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Twentieth Century Reanalysis (20CR) project precipitation data (Slivinski *et al.*, 2019) was used for the period 1920–1940. These data are available at a daily time step at a spatial scale of 1° (111 km at the equator). These are not measured data, but rainfall data from a global climatic model (reanalysis).

4.6.3 Air temperature

4.6.3.1 Digitization of historical archives

Air temperature data are available at a monthly time step in paper archives in the same river bulletins that contain streamflow data. A total of 23 monthly temperature series with data available for the period 1926–1939 have been digitized for the Simbi database. These temperature series are not continuous over time and there are significant gaps in some series.

4.6.3.2 NOAA 20CR reanalysis air temperature

The NOAA reanalysis air temperature database (Slivinski *et al.*, 2019) was used in this study. This air temperature database is available at the same spatiotemporal resolution as the NOAA rainfall data (see section 4.6.2.3).

4.6.4 Berkeley Earth Surface Temperature (BEST)

The BEST product was used, as retrieved from the <http://berkeleyearth.org/> website (Rohde *et al.*, 2013). BEST is a gridded air temperature reanalysis for lands, starting in 1753 at the monthly resolution, and in 1880 at the daily resolution, with a 1° spatial resolution.

4.6.5 Digital Elevation Model (DEM)

The digital elevation model used in this study is the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) of the *United States Geological Survey* (USGS) and the *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). The digital elevation model was extracted for Haiti and is available at a spatial resolution of 90 m (Reuter *et al.*, 2007).

4.7 Methodology

This section presents the methodology followed (i) to select the climate series used for producing catchment climatic series, (ii) to simulate continuous monthly streamflow series with GR2M for 24 catchments selected and daily streamflow series with GR4J for 21 of the 24 catchments where daily rainfall data were available, and (iii) to compute hydrological indices and signatures for the selected catchments.

The conceptual lumped GR2M and GR4J models are described in Appendix A.2.2. The KGE objective function (Kling–Gupta efficiency ; Gupta *et al.* (2009)) was used to evaluate the performance of both models. The KGE score is defined by the following analytical formula :

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - r)^2 + (1 - \alpha)^2 + (1 - \beta)^2} \quad (4.1)$$

where r is the correlation coefficient, α is the ratio of the standard deviation of the simulated streamflow to the standard deviation of the observed streamflow, and β is the ratio of the mean of the simulated streamflow to the mean of the observed streamflow.

4.7.1 Selection of streamflow data and catchments

4.7.1.1 Selection of streamflow series

An analysis of the 70 available streamflow series was performed to select the “hydrologically relevant” streamflow series. It resulted in the selection of 24 series. Four criteria were used to make this selection :

1. The annual hydrographic bulletins reported the accuracy with which rating curves were established through three ratings : “well established,” “fairly well established,” and “poorly established.” Most of the streamflow series with “poorly established” rating curves were found to have significant measurement differences between periods. Therefore, the nine streamflow series with “poorly established” rating curves were not used in the remainder of this study.
2. Three hydrometric stations were located downstream of diversion channels or small dams used for irrigation. These streamflow series poorly represent the seasonality of streamflow, and are therefore considered to be influenced by human activities. These streamflow series were not used in the remainder of this study.
3. Eleven hydrometric stations were located downstream of resurgences or springs. These groundwater resurgences are beyond the scope of this work, which is limited to surface streamflow. Therefore, these streamflow series were not used in the remainder of this study.
4. The 23 streamflow series that had less than 5 years of data were not used in the remainder of this study.

4.7.1.2 Catchment boundaries and areas

The contours of the 24 catchments corresponding to the 24 selected hydrometric stations were delineated using the SRTM digital terrain model(Reuter *et al.*, 2007) and the TauDEM algorithm (Tarboton *et al.*, 2005). Numerically calculated catchment areas were compared with those reported in river bulletins (areas estimated from U.S. Army maps). Two factors account for significant differences between the two areas :

1. The exact positions of the hydrometric stations are not known. Some stations have been relocated manually based on information in the hydrographic bulletins (name of a bridge, main road, monuments, etc.),
2. Due to the low resolution of the numerical model used, the numerically obtained streamflow may differ from the actual streamflow, especially in plain areas near the estuaries. Hydrometric stations were therefore placed on the digitized rivers.

The station relocation process was repeated several times until the error between the two areas was less than 10%. The geographic locations of the 24 selected hydrometric stations are shown as red dots in figure 4.3.

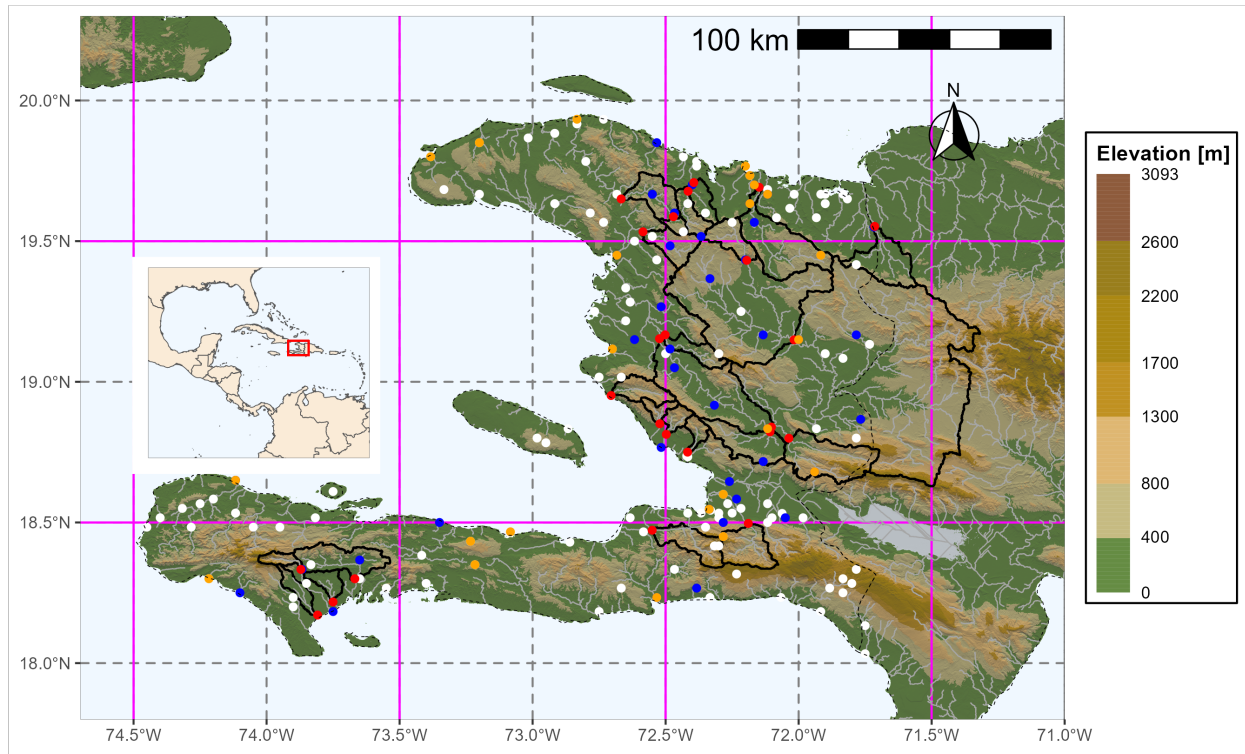


FIGURE 4.3 – Location of the 24 hydrometric stations used (red dots), the associated catchment contours (black solid lines), and the location of all rain gauges with monthly data for the period 1920–1940 (white, orange, and blue dots). Rain gauge stations with air temperature data are shown in orange. Rain gauges considered relevant for hydrological modeling are shown in blue (see section 4.7.2.1). NOAA 20CR pixels are shown in purple, the border between Haiti and the Dominican Republic is shown as a dashed black line, and the background topography is from the SRTM database.

4.7.2 Building catchment climate series

4.7.2.1 Rainfall

For each catchment, the most relevant rain gauges for rainfall–runoff modeling were identified. The performance of a rainfall–runoff model is known to improve with a better description of the rainfall inputs to the catchment (Andréassian *et al.*, 2001). Therefore, GR2M was used as an analytical tool to select the most relevant rain gauge combination for each catchment.

Three types of rainfall data were used as inputs to GR2M : (i) NOAA 20CR rainfall data, (ii) data from all available rain gauges, and (iii) data from several possible combinations of rain gauges.

1. NOAA 20CR rainfall data

Catchment-scale rainfall series were calculated as a weighted average of NOAA 20CR rainfall. The weights are proportional to the area of the NOAA pixel overlapping the catchment. The areas of most catchments are

significantly smaller than the NOAA 20CR pixel. Thus, neighboring catchments located on the same NOAA grid cell will have the same rainfall series (see figure 4.3).

2. Reference rainfall at the catchment scale

For each catchment, an initial rainfall series, called “reference rainfall,” was calculated as a weighted average of monthly rainfall data from Thiessen polygons (Croley & Hartmann, 1985; Han & Bray, 2006). Due to the high percentage of missing data in most rainfall series, the weights obtained from the Thiessen polygons were adjusted according to the data available at each time step : raingauges with missing data for a month m are not used for that month, and only raingauges with data for that month m are considered. This procedure has the disadvantage of potentially introducing non-stationarity in the catchment rainfall series according to the percentage of missing data for each raingauge. The low density of raingauges and the high spatial variability of rainfall in Haiti (Moron *et al.*, 2015) make it difficult to apply methods to estimate missing data (Benoit *et al.*, 2022; Di Piazza *et al.*, 2011; Oriani *et al.*, 2020). Therefore, gap-filling methods were not used.

3. Multiple raingauge combinations

All possible raingauge combinations are calculated for each catchment (combination of 1, 2, 3, ..., n raingauges, where n is the number of available raingauges). The catchment scale rainfall is calculated for each of the raingauge combinations using Thiessen polygons. Since the raingauges used do not always have continuous records, some combinations of raingauges lead to gaps in catchment-scale rainfall series, which is a problem for continuous rainfall–runoff modeling. In the following, only continuous (gapless) catchment rainfall series were used for rainfall–runoff modeling.

4. Rainfall–runoff modeling for selecting the most relevant raingauge combination

The first 3 years of data (early 1920 to late 1922) were used to initialize the model internal states, and the remaining data were divided into two subperiods with the same available streamflow lengths to perform a calibration–evaluation procedure of parameter sets, as proposed by Klemeš (1986). The “Period 1” (resp. “Period 2”) test corresponds to the use of the first (resp. second) half of available data for calibration and the second (resp. first) half for evaluation. The combination of raingauges with the best KGE score in the evaluation was considered the most relevant for rainfall–runoff modeling.

The KGE values obtained with the different combinations of raingauges are dependent on the model used and therefore do not represent the truth of what the “rainfall relevant for rainfall–streamflow modeling” catchment should be. A different model may produce different results.

4.7.2.2 Air temperature and potential evapotranspiration

The only observed air temperature series are available at a monthly time step and are not available for the entire study period (1920–1940). In our context, continuous air temperature series are needed to estimate potential evapotranspiration (PET) series at the catchment scale. Because the temperature series are incomplete, an annual-mean temperature was calculated for each station and used in the rainfall–runoff model.

Several studies have evaluated the impact of imperfect knowledge of temperature data (using annual averages in our study) on the performance of rainfall–runoff models (Burnash, 1995; Fowler *et al.*, 2021; Kribèche, 1994). The results converge to show that this source of uncertainty is the least important and that it can be largely compensated by the model during calibration. To verify this hypothesis, two complementary temperature databases (NOAA 20CR and BEST) were used as inputs to the GR2M model. The aim is to test whether the performance of the model (KGE score) is sensitive to strong differences in temperature data.

1. Using NOAA 20CR and BEST air temperature

Catchment temperature series were calculated at the daily time step as a weighted average of the NOAA 20CR and BEST air temperatures. The weights are proportional to the area of the NOAA 20CR or BEST pixel overlapping the catchment.

2. Using available meteorological stations

Annual-mean temperature series were calculated for each catchment at the monthly time step using the observed (digitalized data) temperatures. Daily temperature series were then derived by interpolation from a second-degree polynomial. A similar work of interpolation of monthly temperature series to obtain daily temperatures was performed by Andréassian *et al.* (2004). Daily temperature series at the catchment scale were calculated using the interpolated daily temperature series and Thiessen polygons (Croley & Hartmann, 1985; Han & Bray, 2006).

3. PET catchment series

The PET series are calculated using the formula of Oudin *et al.* (2005), which is based on air temperature. This formula was chosen for the calculation of PET for two main reasons. The other climate variables commonly used to calculate PET (wind speed, humidity, radiation, etc.) are unavailable, which justifies the use of a formula based only on temperature in a context where data are scarce. Moreover, it is one of the most relevant methods for rainfall–runoff modeling compared to 27 models for calculating PET and has been tested on more than 300 catchments covering several climatic zones, including tropical zones (Oudin *et al.*, 2005), as is the case in Haiti. It uses as inputs the series of air temperature at the catchment scale and the average latitude of the catchments to calculate extraterrestrial radiation.

4.7.3 Water balance

The water balance was used as a complementary analytical tool to the GR2M model. The annual average water balance was presented in the form of a Turc–Budyko diagram, as described by Coron *et al.* (2015), for all 24 study catchments.

4.7.4 Simulation of monthly and daily streamflow series for the period 1920–1940

For each catchment, three sets of parameters were used to simulate the streamflow series over the period 1920–1940. The first two sets of parameters called “Period 1” and “Period 2,” respectively, are those described in section 4.7.2.1 and are obtained by calibration over the two subperiods from the catchment rainfall calculated from the raingauges considered most relevant and the PET series calculated from the digitized temperature series. The third set of parameters called “Period 3” is obtained by calibration over the whole period 1920–1940 (the first 3 years being used for model warm-up). The GR2M model was used to simulate the monthly streamflow series for the 24 basins studied, and the GR4J model was used to simulate the daily streamflow series for 21 of the 24 catchments where daily rainfall data are available. Modeling was performed using the airGR package (Coron *et al.*, 2017; Coron *et al.*, 2023) and R software (R Core Team, 2022).

4.7.5 Calculation of catchment attributes

Similar to the CAMELS databases (Addor *et al.*, 2017; Alvarez-Garreton *et al.*, 2018; Chagas *et al.*, 2020; Coxon *et al.*, 2020; Fowler *et al.*, 2021), several attributes were calculated for each catchment. Thus, 48 attributes grouped into six classes (topography, geology, land use, land acquisition type, climate index, and hydrological signature) were calculated (see Table A.2 in Appendix A.2.3). These attributes were selected according to the data available in Haiti and their relevance to Haitian catchments.

The catchment contours defined in section 4.7.1.2 and the SRTM digital terrain model with a resolution of 90 m (Reuter *et al.*, 2007) were used to calculate the topographic attributes. The location of the catchment outlets was defined by the relocation process described in section 4.7.1.2. The hydrological signatures were calculated on the observed streamflow series and on the three simulated streamflow series with the three sets of calibration parameters (see section 4.7.4). Thus, there are four indicators for each of the hydrological signatures (one indicator for observed streamflow and three indicators for simulated streamflow).

The data used to produce the geological attributes, land cover characteristics, and aquifer types are produced by the CNIGS (Centre National de l'Information Géospatiale) and the BME (Bureau des Mines et de l'Energie). These data are freely available via the link (<https://haitidata.org/>, accessed on 08/12/2022). Unfortunately, no documentation exists for these data, with the exception of the geological data, which are very well documented (Boisson & Pubellier, 1987; Butterlin, 1960; Terrier *et al.*, 2014). Land use data are available for 1995 and 1998. We did not have land use data for the most recent period (2010–2022), let alone for the study period (1920–1940). Land use has changed significantly in recent decades, mainly due to massive deforestation and uncontrolled urbanization (Churches *et al.*, 2014; Hedges *et al.*, 2018; Salomon *et al.*, 2022). Although the past (1920–1940) and the current land (2000–2020) cover is not what it was in 1995 and 1998, we have nevertheless chosen to present two land cover attributes calculated over these periods. For each catchment, the geological, land use, and aquifer type layers of the shapefile are cut out to enable the determination of the various corresponding attributes. Table A.3 in Appendix A.2.3 shows the lithology types, aquifer types, and land cover types.

4.8 Results

4.8.1 Impact of air temperature and PET series on rainfall–runoff modeling

Figure 4.4 shows (i) the relationship between digitized air temperatures (BHS) and the 20CR and BEST reanalyses (top three plots) as well as (ii) the performance (KGE score) and parameters of the GR2M model (bottom three plots) using the three air temperature databases to compute PET series. BEST overestimates the mean temperature (symbolized by the red dots in the boxplots in Figure 2, top left) and 20CR has difficulty representing temperatures below 20°C and over 28°C. The low dispersion (upper middle figure) of 20CR and BEST may be due to a spatial averaging effect at the scale of the grid boxes (1° for both), which are large for the study area. In addition, there is no linear correlation between the two temperature databases, and the 20CR data are a poor representation of the seasonal temperature variability in Haiti (upper right figure).

Although there is no clear correlation between the digitized and reanalyses temperatures, the KGE values (KGE in the evaluation for the two subperiods) obtained with the three air temperature databases are very similar for most of the catchments (bottom left figure). This shows that the GR2M model, through its two parameters and especially the X2 parameter (bottom right figure), has the ability to absorb the potential biases associated with the air temperature data.

The three temperature databases could be used a priori for rainfall–runoff modeling, as the model parameters absorb the associated biases. However, since the reanalysis databases do not represent temperature well at the catchment scale, they will not be used in the remainder of this study. Therefore, the digitized temperatures will be used to build the Simbi database.

4.8.2 Selection of relevant raingauges

4.8.2.1 GR2M performance analysis

Reference rainfall and rainfall from all possible combinations of raingauges were calculated at the catchment scale as described in section 4.7.2.1. Table A.1 in Appendix A.2.3 presents the number of raingauges used to calculate reference rainfall, the number of combinations, and the most relevant raingauges for rainfall–runoff modeling for each of the catchments.

Figure 4.5 shows the summary of the KGE scores in the evaluation and its three components obtained with NOAA 20CR rainfall, reference rainfall, and relevant raingauge combination. The lowest KGE scores are obtained with NOAA 20CR rainfall, highlighting the limitations of this rainfall database for rainfall–runoff modeling in Haiti and the need to use observed data rather than reanalyses. There is also a clear improvement in KGE values when using the relevant raingauges compared to the reference raingauges. Nevertheless, some

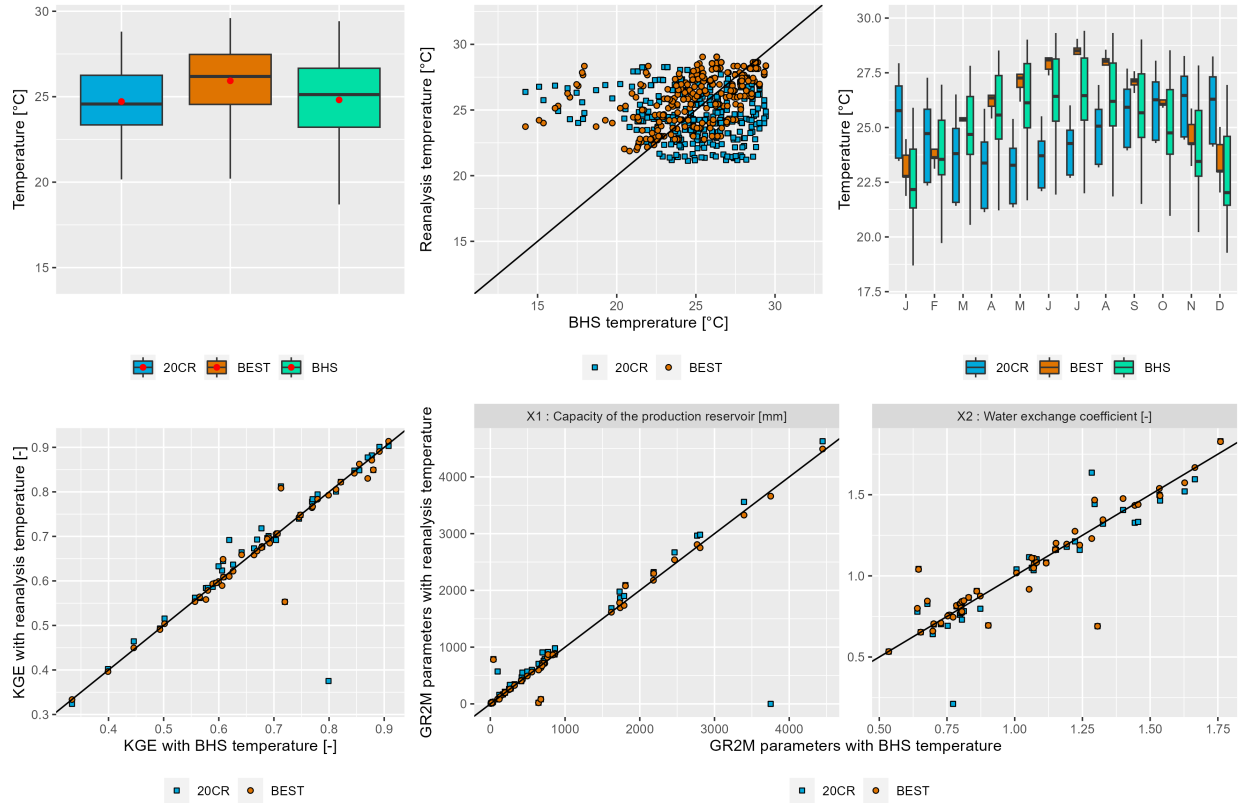


FIGURE 4.4 – Top left to right : Synthesis of monthly temperatures from the digitized archive (BHS) and reanalyses as a boxplot, plot of monthly temperatures from reanalyses versus digitized, seasonal temperature variability as a boxplot (each boxplot represents monthly temperatures for all basins). Bottom left to right : KGE values in the evaluation for the two subperiods and GR2M parameters X1 and X2 calculated with the two temperature databases.

catchments have poor KGE scores in the evaluation, despite the use of relevant raingauges. Among the three components of the KGE, the correlation coefficient (r) contributes most to the improvement in model performance through the use of ground-based rainfall data. Indeed, there is a weak correlation between the simulated and observed streamflow obtained with NOAA 20CR rainfall data, and this correlation is greatly improved by using observed rainfall data (reference raingauges and relevant raingauges). On the other hand, the coefficients α and β , which represent variability and bias, respectively, contribute most to the improvement of the model performance using the relevant raingauges compared to the reference raingauges. The values of these coefficients are much more centered around the optimal value of 1 for the relevant raingauges, while they are more scattered for the reference raingauges.

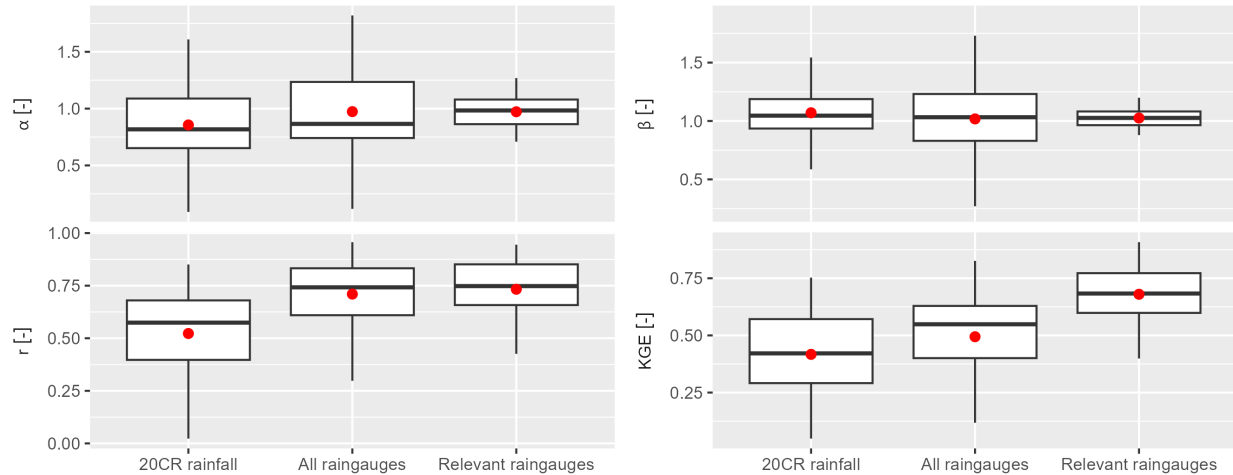


FIGURE 4.5 – Summary of KGE scores in the evaluation and its three components obtained with NOAA 20CR rainfall, reference rainfall, and relevant raingauges combination.

Figure 4.6 shows the spatial distribution of KGE scores in the evaluation using the three rainfall databases. As discussed earlier, the KGE scores in the evaluation with 20CR data are low, with only five catchments having KGE scores over 0.60. The performance (KGE score) improved for 21 catchments with the relevant raingauge combination, and no improvement was achieved for three catchments only : the catchments of Tumbe at Passe Fine (Q-044), Rivière du Sud at Camp-Pérrin (Q-008), and Coujol at Proby (Q-006). Two of these three catchments (Q-044 and Q-008) were already performing relatively well, with average KGEs in the evaluation over 0.60, and the use of the relevant raingauge combinations did not improve their performance further. Despite the use of relevant raingauges, four catchments have KGE values below 0.50, two of which have negative or near-zero KGE values : the Trois Rivières at Plaisance catchment (Q-051) and the Montrouis at Pont Toussaint catchment (Q-058).

4.8.2.2 Analysis of GR2M parameters

In figure 4.7, the influence of the relevant raingauge combinations on the stability of the model parameters is evaluated. The ratios of the calibration parameters of the two subperiods were plotted as a boxplot for the reference and relevant raingauge combinations. The results showed that the relevant raingauge combinations led to more stable X1 and X2 parameters (ratio close to 1). In fact, the length of the boxplot of the reference raingauges is greater than that of the relevant raingauges for the two parameters X1 and X2, highlighting the greater dispersion of the ratios around the optimal value of 1, i.e., less stable calibration parameters for the reference raingauges. Overall, the relevant raingauges led to a better performance and stability of the model parameters.

4.8. RESULTS

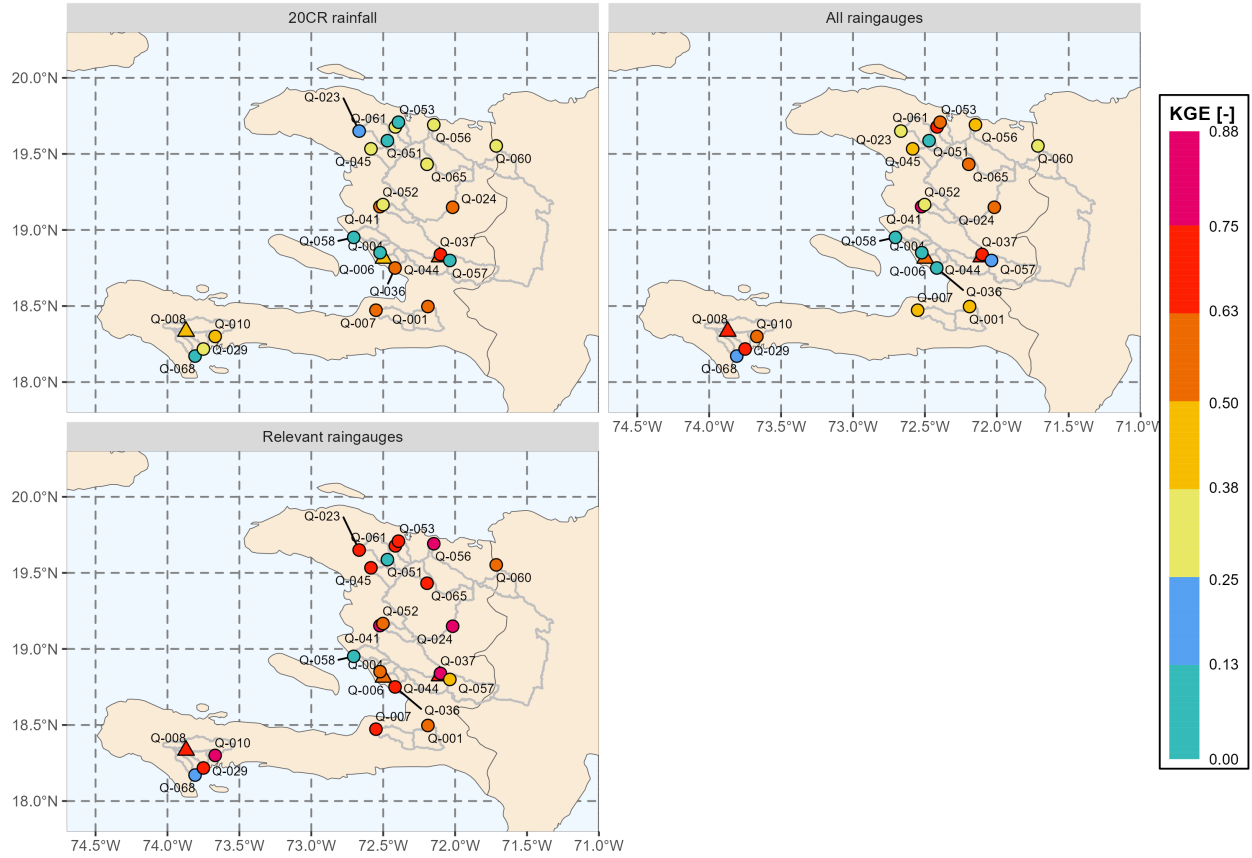


FIGURE 4.6 – Spatial distribution of the average of the two KGE values in the evaluation for the two subperiods. Dots represent catchments where model performance was improved by using the relevant rain-gauge combinations, triangles represent catchments where model performance was not improved by using the relevant rain-gauge combinations.

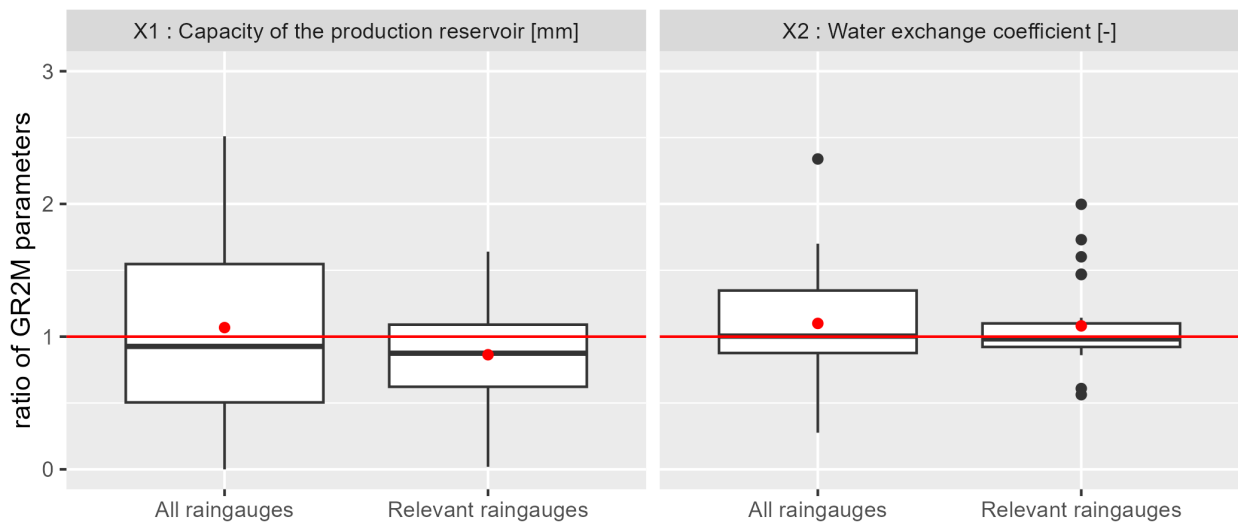


FIGURE 4.7 – Ratio of the GR2M calibrated parameters X1 and X2 over the two subperiods for the reference and relevant rain-gauge combinations.

4.8.2.3 Characteristics of relevant raingauge combinations

Figure 4.8 shows that the raingauges used for the relevant raingauge combinations are those located at low elevations and with the longest data series. The relatively low percentage of missing data from the relevant raingauges ensured better model stability (see section 4.8.2.2) and contributed to the improvement in the model performance, especially by reducing the biases between simulated and observed streamflow (improvement in α and β parameters; see section 4.8.2.1). Raingauges at higher elevations are more difficult to access and are the least maintained, and therefore have very high percentages of missing data. However, the model tends to discard raingauges with high percentages of missing data, which is why the retained/selected raingauges are generally located at lower elevations. There is no clear trend of cumulative rainfall in the selection of relevant raingauges. However, some very wet raingauges (rainfall totals over 180 mm/month) were selected as relevant raingauges.

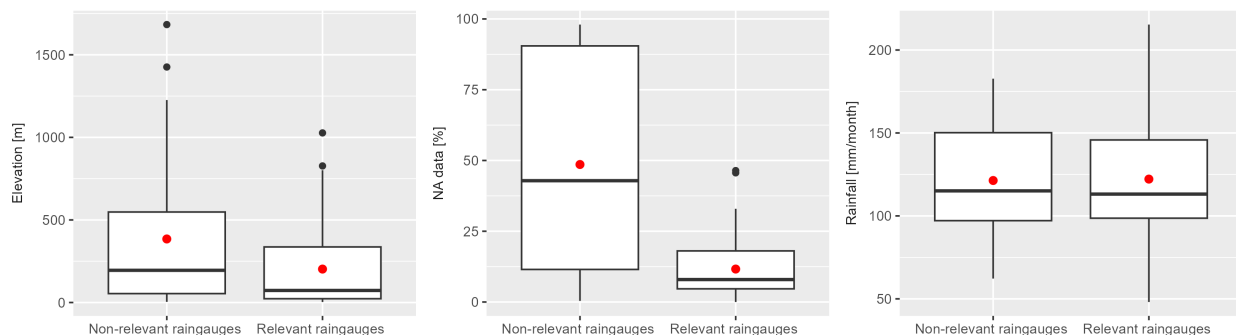


FIGURE 4.8 – Distribution of elevations, percentage of missing data, and cumulative monthly rainfall for relevant (40 gauges) and nonrelevant (21 gauges) raingauges.

4.8.3 Water balance

The average annual water balance, in the form of a Turc–Budyko diagram, was used as another diagnostic tool to verify the hydroclimatic consistency of the data assembled. The results, presented in figure 4.9, show that the studied catchments correspond to conservative catchments (points located in the white part of the graph, i.e., $Q < P$ and $P - Q < PET$), except for the catchments of Rivière du Sud at Camp-Perrin (Q-008) and Rivière Grise (Q-001). More than 90% of the Q-008 catchment is on a calcareous geological formation, and part of the catchment is also affected by karstic aquifers. Therefore, there may be a contribution of water from neighboring catchments that justifies such a high Q/P ratio, but no such study has been conducted to confirm or refute this hypothesis. The interpretation of the results for the Q-001 catchment is more difficult, as it may be related to the choice of relevant raingauge combinations for this catchment, or to a real exchange of streamflow with the neighboring catchments, or to a mixture of both. The water balances obtained with the relevant raingauge combinations are shifted to the lower right (blue circles and triangles). This is related to the fact that some of the raingauges used are very wet (see section 4.8.2.3) and therefore increase the rainfall at the catchment scale. No clear trend was observed between the water balances obtained with observed streamflow and those obtained with simulated streamflow.

4.8.4 Performance of the rainfall–runoff models

Three sets of parameters (see section 4.7.4) were used to simulate three sets of monthly streamflow for each of the 24 catchments using the GR2M rainfall–runoff model, forced by the relevant raingauge combinations and the PET calculated with digitized air temperatures. The results, presented on the left in figure 4.10, show that the KGE scores have a median value of 0.75 in the calibration and 0.67 in the evaluation.

The relevant raingauges have daily data for 21 of the 24 catchments. Therefore, daily streamflow series were simulated by the GR4J model for these 21 catchments. The KGE scores have a median value of 0.57 in the

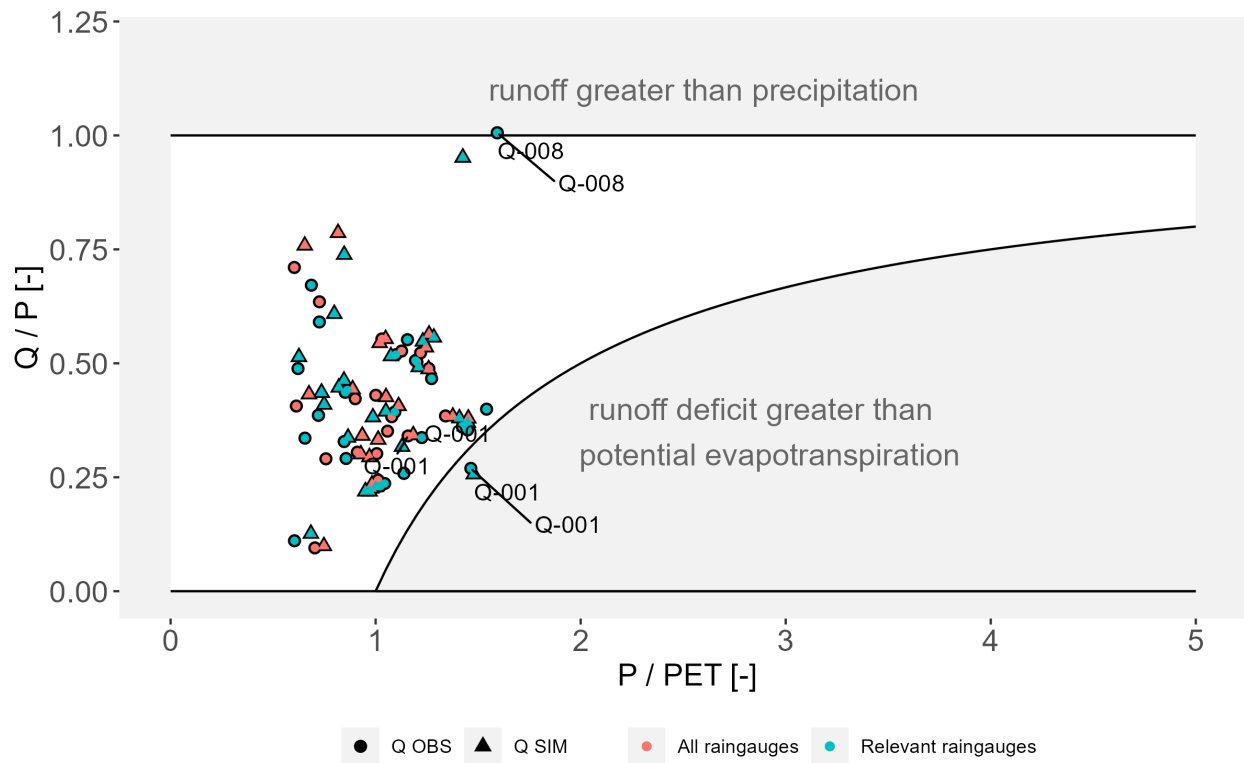


FIGURE 4.9 – Average annual water balance in the form of a Turc–Budyko diagram for all 24 catchments. The reference raingauges are shown in red and the relevant raingauges are shown in blue. Observed streamflows are shown as circles and simulated streamflows with parameters calculated over the whole period of available data are shown as triangles.

calibration and 0.44 in the evaluation (figure 4.10, left). The daily rainfall data used as input to GR4J may partly explain the low KGE values obtained at the daily time step. Indeed, raingauges with high percentages of missing data led to instability and poor performance of the GR2M model in most catchments, which required searching for relevant raingauges to improve the stability and performance of the model at the monthly time step (see section 4.8.2). However, there is a higher percentage of missing data in the available daily rainfall data than in the monthly data. Furthermore, the limited availability of daily data makes it difficult to improve the performance of the model at the daily time step.

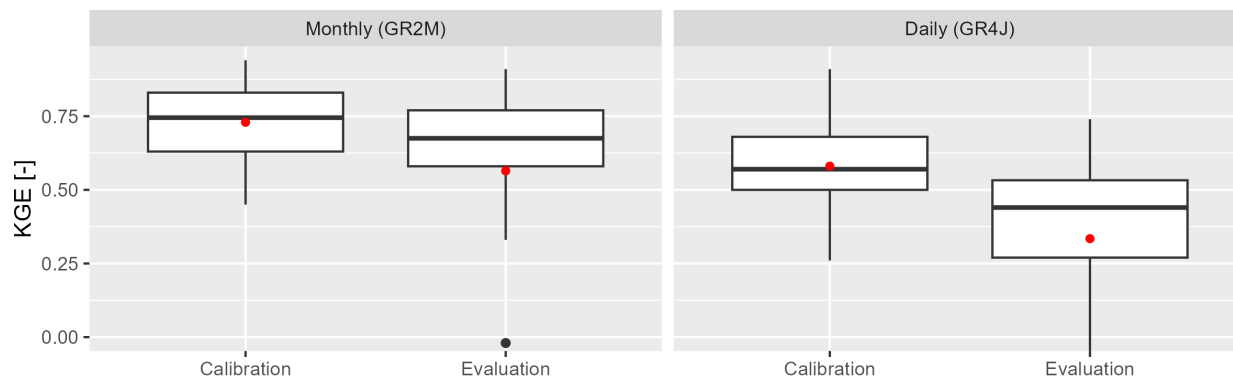


FIGURE 4.10 – Synthesis of KGE scores in the calibration and evaluation for modeling with GR2M and GR4J.

4.8.5 Catchment attributes

The 48 catchment attributes were calculated as described in section 4.7.5 and Table A.2. Results for all attributes are not presented in this paper. Only some climate indices and hydrological signatures are presented.

4.8.5.1 Hydrological signature at the monthly time step

The observed and simulated mean annual streamflows from GR2M are displayed in Figure 4.11. The results show that streamflow is higher in the southwest and north of Haiti and lower in the central part. The simulated streamflow represents well the spatial pattern of the observed streamflow and gives good estimates of the observed mean annual streamflow.

The simulated streamflow represents well the seasonality of the observed streamflow (see figure 4.12). However, the simulated streamflows do not provide good estimates of the monthly streamflow values for the two high streamflow periods in May and November (see figure 4.12). The simulated streamflows overestimate the observed values in May and underestimate them in November. In addition, the simulated streamflows slightly overestimate the low values in January.

The aridity indices and runoff coefficients are presented in figure 4.13. The aridity indices show the same spatial pattern as the mean annual streamflow (figure 4.11), i.e., they are greater than 1 in the central part of Haiti (arid zone) and lower in the southwest and north (humid zone).

The runoff coefficients are approximately 0.35 for catchments in the central zone and approximately 0.5 in the southwest and north of Haiti. The South River catchment at Camp-Perrin (Q-008), discussed above, has a runoff coefficient greater than 1, meaning that runoff is greater than rainfall. This high runoff coefficient can be explained by the presence of karst aquifers in the Q-008 catchment.

4.8. RESULTS

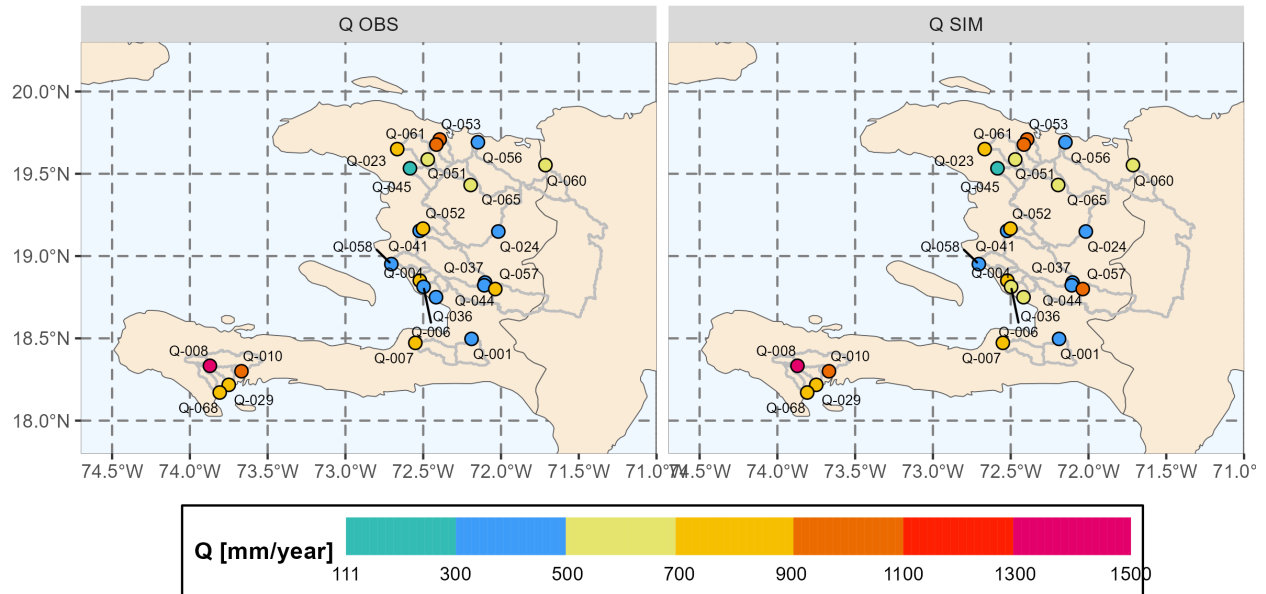


FIGURE 4.11 – Spatial distribution of observed mean annual streamflow on the left and simulated streamflow with the GR2M parameters calculated over the entire period of available data on the right.

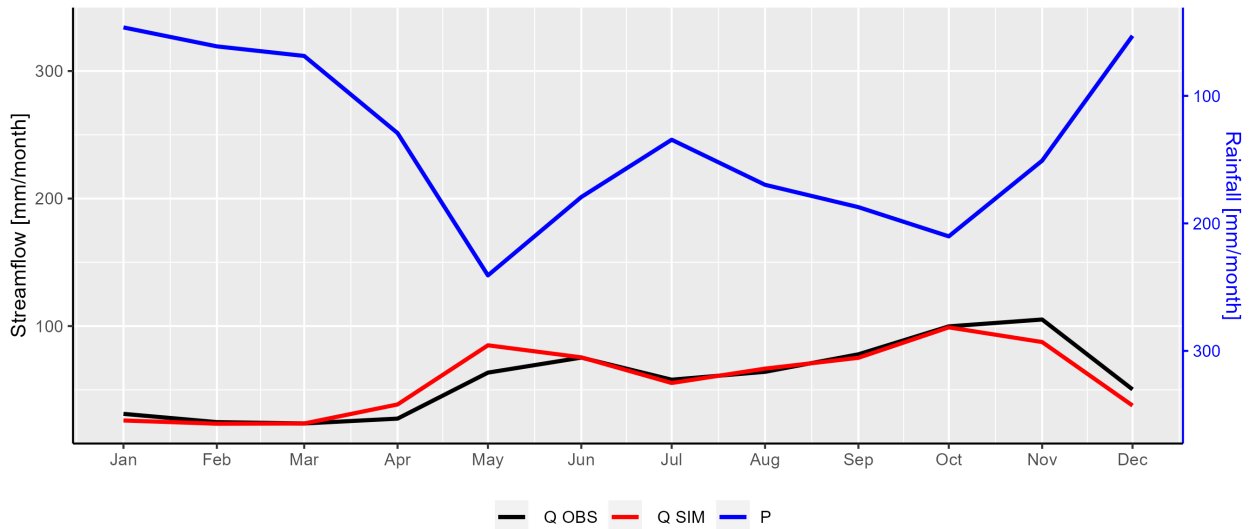


FIGURE 4.12 – Seasonality of rainfall (rainfall obtained by combining the relevant raingauges) in blue, observed streamflow in black, and simulated streamflow with the parameters calculated over the entire period of available data in red.

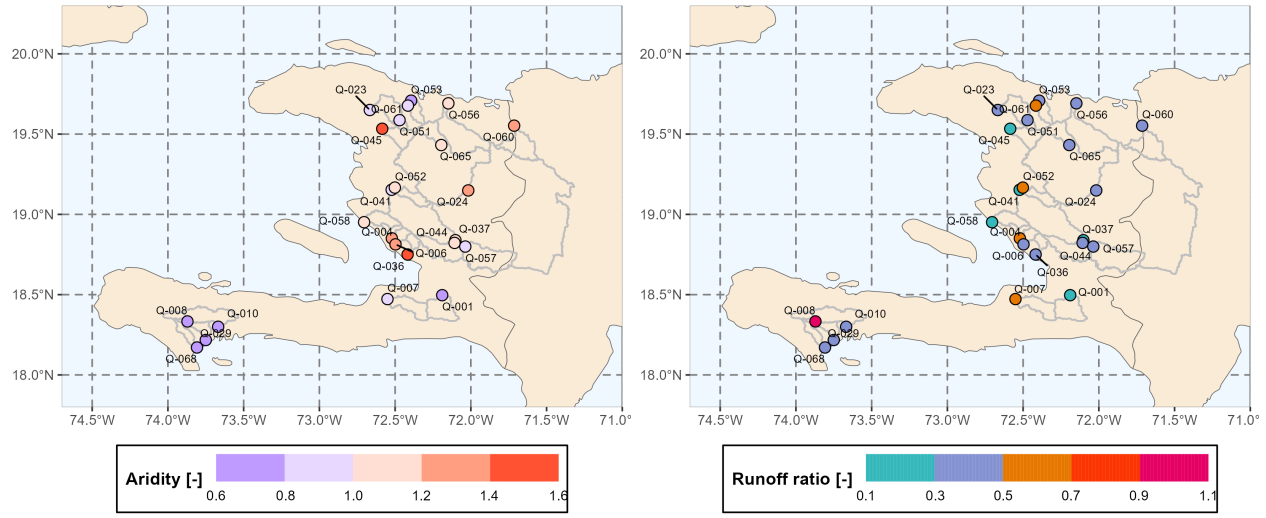


FIGURE 4.13 – Aridity index calculated from rainfall series from relevant raingauges on the left, and runoff coefficient calculated from observed streamflow series on the right.

4.8.5.2 Hydrological signature at daily time step

The hydrological attributes of the simulated and observed streamflow for the 21 selected catchments are summarized in figure 4.14. The results show that the simulated streamflows are able to represent average daily streamflow well, underestimate low streamflow (5% quantile), and overestimate high streamflow (95% quantile) and baseflow indices (Pelletier & Andréassian, 2020). These overestimates of high streamflow and underestimates of low streamflow result in increased frequencies and durations of simulated high and low streamflow relative to observed streamflow. This poor representation of simulated high and low streamflow is a consequence of the poor performance of the GR4J model for most catchments.

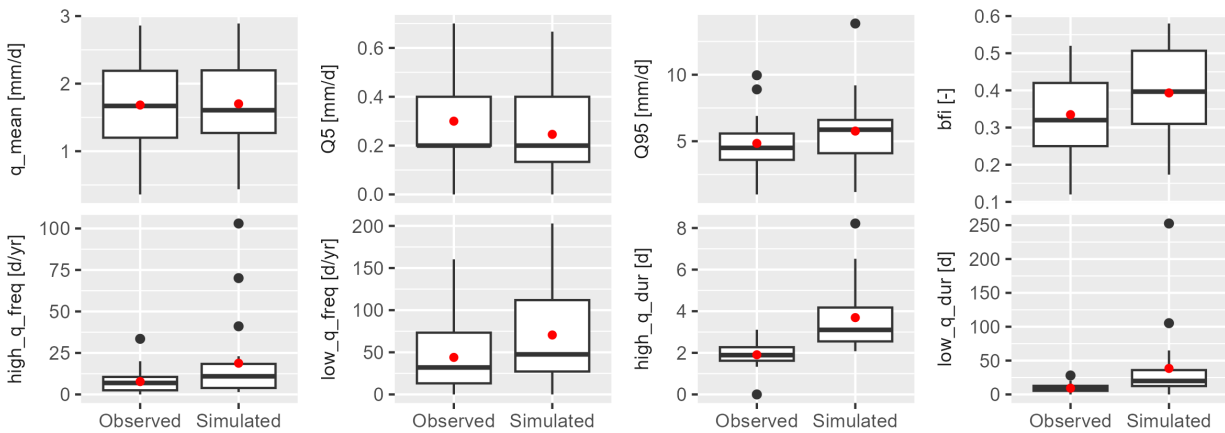


FIGURE 4.14 – Summary of hydrological signatures at the daily time step for observed and simulated streamflow and for 21 catchments. From top left : daily mean streamflow, 5% quantiles, 95% quantiles, baseflow, high streamflow frequencies, low streamflow frequencies, high streamflow durations, and low streamflow durations.

4.8.5.3 Geological and hydrogeological attributes

More than 80% of the total area of the 24 catchments consists of limestone sedimentary rocks (see figure 4.15). These geological formations are the basis for sedimentary aquifers of varying permeability, carbonate aquifers, and karst aquifers (see figure 4.16). These hydrogeological structures favor the exchange of streamflow of greater or lesser magnitude between adjacent catchments, which can result in catchments that are not always hydrologically “closed.” In addition to the quality of the data used in our study area, the complex hydrogeology of Haiti may be an explanatory factor for the low KGE values obtained in the validation for several catchments. Unfortunately, few studies have focused on hydrological and hydrogeological modeling in Haiti due to the lack of available data. Simbi could be a starting point for a better understanding of Haitian hydrology.

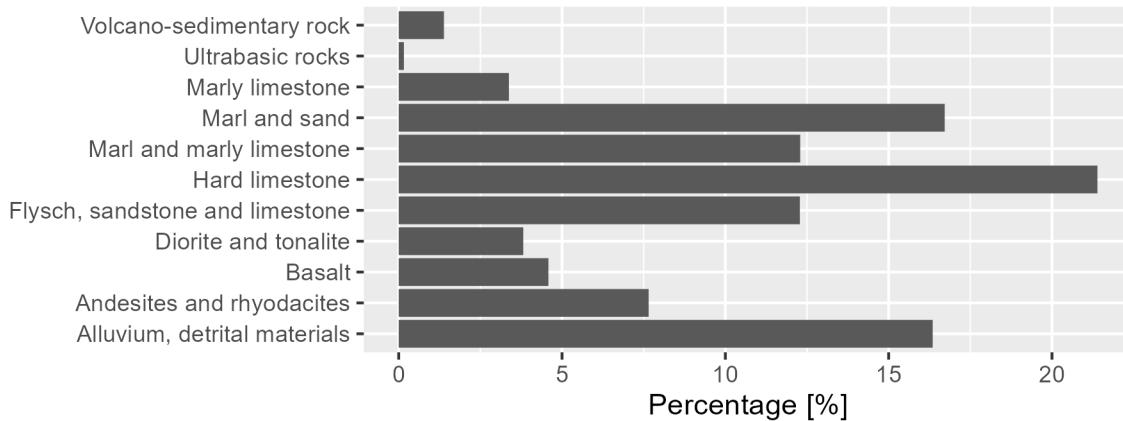


FIGURE 4.15 – Percentage of each geological formation in relation to the total area of the 24 catchments.

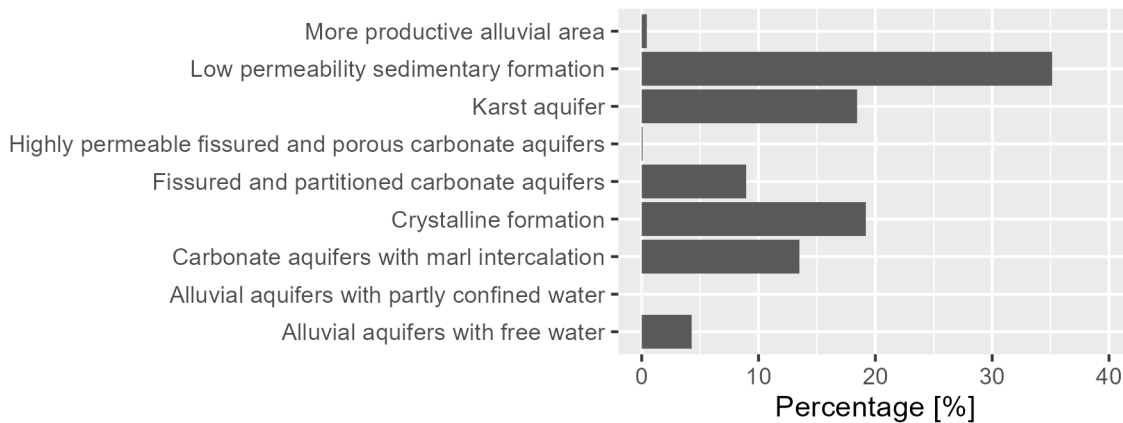


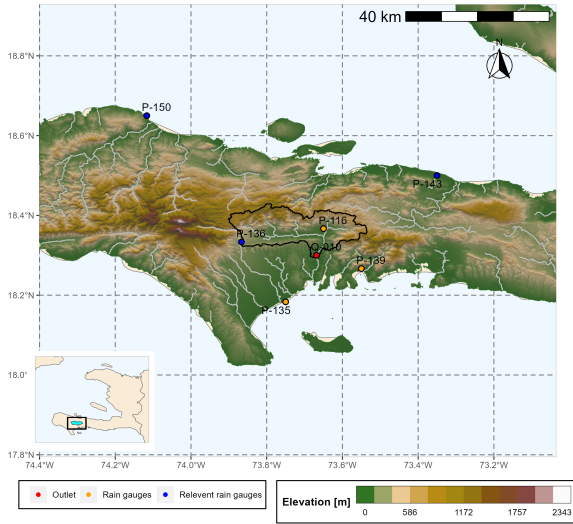
FIGURE 4.16 – Percentage of each aquifer type in relation to the total area of the 24 catchments.

4.8.6 Graphical summary sheets of the Simbi database

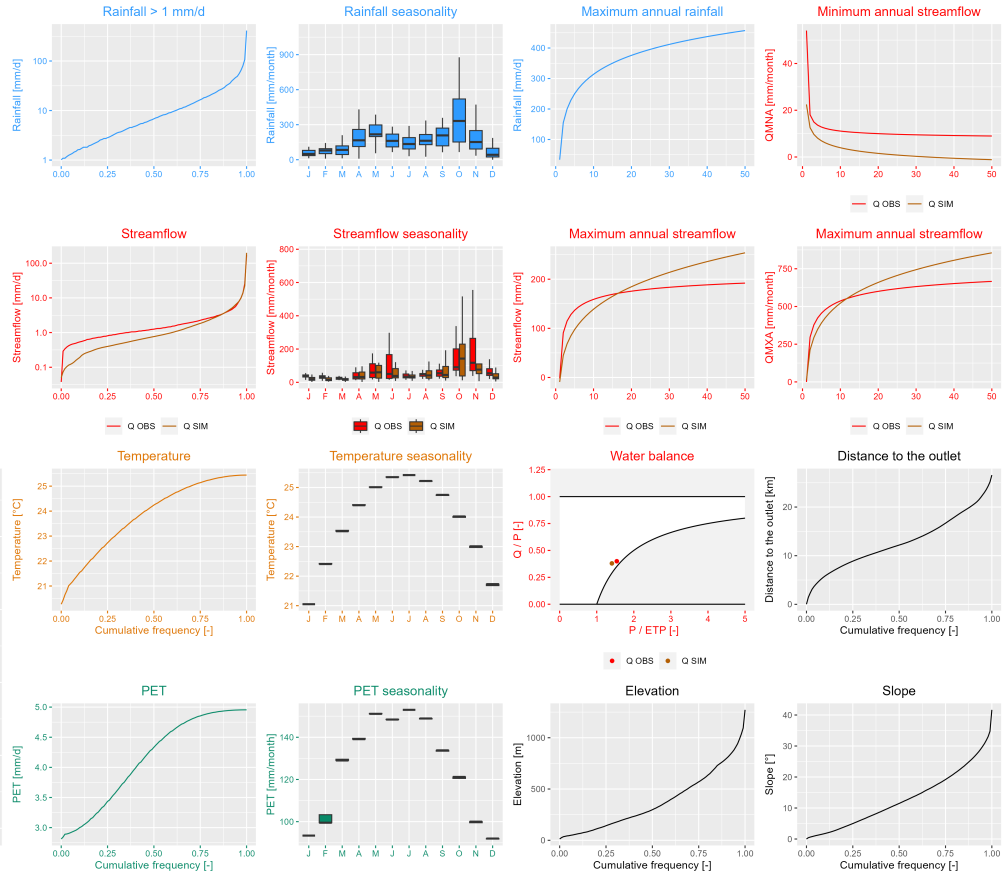
The main results are summarized in sheets that highlight the key characteristics of the catchments studied. These summary sheets have been inspired by those prepared by the catchment hydrology research group at INRAE (Brigode *et al.*, 2020). An example is shown in figure 4.17 describing the main characteristics of the Cavaillon catchment, which was studied several times after Hurricane Matthew (Mathieu, 2023; Joseph *et al.*, 2018; Joseph, 2019). This catchment has an area of 320 km², half of which is at an elevation above 250 m, with a slope greater than 10°, and overlies a karst aquifer. During the rainy season (April–November),

the catchment receives more than 150 mm/month of rainfall and more than 280 mm/month during the peak rainfall in May and November. Streamflows can reach 100 mm/month during May–June and October–November. Simulated streamflows underestimate maximum annual flows with a return period of less than 10 years and overestimate flows beyond 10 years. Simulated streamflows also underestimate low flows (annual minimums). Thus, during flood periods, we can expect daily streamflows of several hundred millimeters, and conversely, during dry periods, streamflows can be on the order of 10 mm/month.

CAVAILLON - RIVIERE CAVAILLON (Q-010)

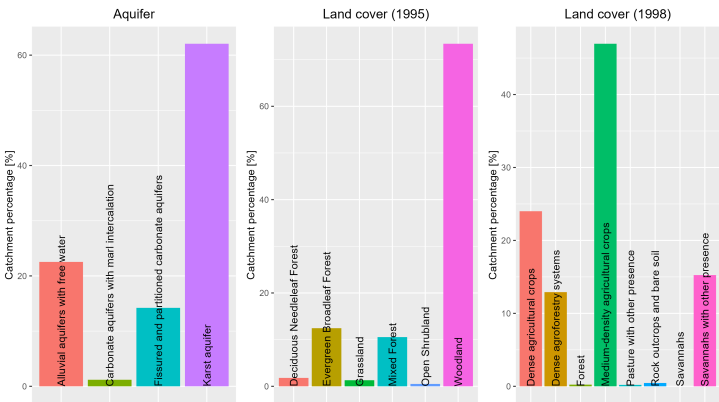


Area [km ²]	Data	Period	Unit
321.21	Streamflow	1924-1940	mm/d
Longitude [°W] : -73.668	Rainfall	1920-1940	mm/d
latitude [°N] : 18.3	PE	1920-1940	mm/d
KGE (calibration) with GR2M [-] : 0.89	Temperature	1920-1940	mm/d
KGE (calibration) with GR4J [-] : 0.81			
Aridity index [-] : 0.71			
Runoff ratio [-] : 0.44			
Baseflow index [-] : 0.32			



R. Bathelemy, P. Brigode, V. Andréassian, C. Perrin, V. Moron, C. Gaucherel, E. Tnc, D. Boisson. 2023

FIGURE 4.17 – Summary sheet of the characteristics of the Cavaillon catchment.



4.9 Data availability

The Simbi database is available for download at :<https://doi.org/10.23708/02POK6> (Bathelemy *et al.*, 2023a). The SIMBI_README.txt file contains a description of the database and the organization of the various files and folders. The 00_OBSERVED_DATA folder contains the observed data (daily streamflow, daily and monthly rainfall, and monthly air temperatures). The 01_CATCHMENT folder contains the contours and the outlets of the 24 catchments. The 02_SIMULATED_STREAMFLOW folder contains the simulated monthly and daily streamflow series. The 03_ATTRIBUTE folder contains all 48 catchment attributes. The 04_MAP folder contains catchment graphical summary sheets summarizing all available data and the main results obtained for each catchment.

4.10 Conclusion and perspectives

To the best of our knowledge, the hydrological database presented in this article represents the first open access work of an exhaustively documented hydro-meteorological dataset for Haiti. This database, called “Simbi,” contains station observations and catchment-scale data. The station observations contain :

1. 59 daily rainfall series available from 1920 to 1940,
2. 156 monthly rainfall series available from 1905 to 2005,
3. 70 daily streamflow series available from 1920 to 1940,
4. 23 monthly air temperature series.

The data at the catchments scale contain :

1. Simulated monthly streamflow series for 24 catchments and simulated daily streamflow series for 21 catchments using three sets of parameters (three simulated streamflow series per catchment) from the GR2M monthly and GR4J daily rainfall–runoff models, and
2. A set of indices that describe a wide range of low, moderate, and extreme rainfall and streamflow characteristics to characterize the hydrological regime and water resources management applications.

The processed database highlights the spatial variability of Haiti’s hydrological conditions. The central part of Haiti is associated with relatively low streamflow and high drought coefficients. Conversely, the north and south of Haiti are associated with relatively high streamflow. In fact, large floods are more frequent in these areas (Terrier *et al.*, 2017). The simulated monthly streamflows perform well in representing average streamflow and their spatial variability. However, the model is less effective at the daily time step (KGE score in the evaluation is below 0.5 for most watersheds). This results in poor representation of the frequency or number of consecutive days with high and low streamflow. This may be due to a combination of the quality of the data used and the calcareous geological formations that can create non-conservative catchments that are difficult to model. Moreover, the estimation of relevant raingauge combinations and the simulation are dependent on the model used. A different model may produce different results. Thus, these results should be used with caution.

Our database can be considered a starting point for any hydroclimatic work in Haiti, since it gathers, in addition to the simulated data, all the hydroclimatic data available in Haiti over several decades. It could help to better understand the Haitian climatology in the twentieth century, and to study the evolution of the climate in Haiti for better adaptation to climate change. The database could also contribute to better knowledge of the hydrology of the catchments and help assess the impact of massive deforestation and anarchic urbanization on the hydrological response of the catchments. Frequency analysis methods to estimate flood return periods can be considered. Thanks to the availability of streamflow series, this database ushers in perspectives for the application of different approaches to rainfall–runoff modeling. Overall, this hydrological database will contribute to a better understanding of hydrological risk in Haiti. The database will be regularly updated by integrating the historical archives that will later be digitized, making it the most complete hydrological database in Haiti.

4.11 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de rassembler l'ensemble des données hydro-climatiques existantes en Haïti et de numériser des séries de pluies journalières et de températures de l'air jugées prioritaires (car concomitantes avec les données de débits disponibles). Le modèle pluie-débit mensuel GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) couplé aux séries de pluies mensuelles de Moron *et al.* (2015) ont été utilisés pour faire le choix des séries de pluviomètres jugées "pertinentes pour la modélisation pluie-débit" pour 24 bassins versants. Les pluviomètres pertinents ont été définis comme étant les pluviomètres dont la combinaison permet d'obtenir les meilleurs scores KGE (Gupta *et al.*, 2009) sur une période d'évaluation. Ensuite, les pluviomètres pertinents et les modèles GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) ont permis de simuler des séries de débits au pas de temps mensuel et journalier pour 24 bassins versants haïtiens. Enfin, 48 indices et signatures hydrologiques ont été utilisés pour caractériser les 24 bassins versants étudiés.

L'ensemble des données observées et simulées et les indices et signatures hydrologiques constituent la base de données Simbi (gardien de la pluie, des eaux douces et des fleuves dans la mythologie haïtienne). La base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a, b), première base de données hydro-climatiques en Haïti, contient des données observées et des données à l'échelle des bassins versants. Les données observées sont formées par :

- a. 59 séries de pluies journalières disponibles sur la période 1920-1940,
- b. 156 séries de pluies mensuelles disponibles sur la période 1905-2005,
- c. 70 séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940,
- d. 23 séries de température de l'air mensuelles disponibles sur la période 1926-1939.

Les données à l'échelle des bassins versants, disponibles sur la période 1920-1940, sont formées par :

- a. des séries de pluies journalières et mensuelles pour 24 bassins versants,
- b. des séries de débits journaliers et mensuels (débits simulés et observés) pour 24 bassins versants,
- c. des séries de températures de l'air journalières et mensuelles pour 24 bassins versants,
- d. des séries d'évapotranspirations potentielles journalières et mensuelles pour 24 bassins versants,
- e. 48 attributs et signatures hydrologiques pour 24 bassins versants.

La base de données Simbi met en évidence la variabilité spatiale des débits en Haïti. La partie centrale d'Haïti est associée à un débit relativement faible et à des indices d'aridité élevés. A l'inverse, le nord et le sud d'Haïti sont associés à des débits relativement élevés. Les débits mensuels simulés représentent bien les débits moyens et leur variabilité spatiale. Le modèle pluie-débit est moins performant au pas de temps journalier (les scores KGE en évaluation sont inférieurs à 0.5 pour la plupart des bassins versants). Il en résulte une mauvaise représentation de la fréquence ou du nombre de jours consécutifs avec des débits élevés et faibles. Cela peut être dû à une combinaison de la qualité des données utilisées et des formations géologiques calcaires qui peuvent induire des bassins versants non conservatifs difficiles à modéliser. En outre, l'estimation des combinaisons de pluviomètres pertinentes et la simulation dépendent du modèle utilisé. Un modèle différent peut produire des résultats différents. Ces résultats doivent donc être utilisés avec prudence.

La base de données Simi peut être considérée comme un point de départ pour tout travail hydroclimatique en Haïti, puisqu'elle rassemble, en plus des données simulées, toutes les données hydroclimatiques disponibles en Haïti sur plusieurs décennies. Elle pourrait aider à mieux comprendre la climatologie haïtienne au vingtième siècle, et à étudier l'évolution du climat en Haïti pour une meilleure adaptation au changement climatique. La base de données pourrait également contribuer à une meilleure connaissance de l'hydrologie des bassins versants en Haïti.

Chapitre 5

Analyse spatio-temporelle des pluies et des débits sur la période 1920-1940

5.1 Objectifs de ce chapitre

Ce chapitre propose d'étudier la variabilité spatio-temporelle et de faire une analyse fréquentielle des pluies et des débits des bassins versants haïtiens. Les données hydrométéorologiques utilisées dans cette étude sont celles qui ont été produites au chapitre 4 et disponibles sur la période 1920-1940.

Une analyse spatio-temporelle des pluies et des débits a été réalisée dans la première partie de ce chapitre. Les régimes ainsi que les variabilités interannuelles des pluies et des débits ont été étudiés. Ensuite, une analyse sur les événements marquants sur la période 1920-1940 a été réalisée en étudiant :

1. les cyclones ayant traversés Haïti sur cette période historique
2. les deux années de fortes sécheresses (1921-1922) en Haïti listées par le BRGM (voir la section 1.3.2).

Une liste d'épisodes de fortes pluies a ensuite été constituée de manière automatique pour chacun des 21 bassins versants étudiés. Puis, les cumuls, les durées et le nombre de ces épisodes de fortes pluies ont été caractérisés ainsi que les débits maximum journaliers associés à ces épisodes de fortes pluies.

Enfin, une analyse fréquentielle a été réalisée afin d'estimer des valeurs de pluies et de débits pour les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans pour chacun des 21 bassins versants étudiés. Pour cela, plusieurs méthodes ont été développées ces dernières décennies afin de prédéterminer les pluies et les débits, et peuvent être regroupées en trois catégories :

1. la théorie des valeurs extrêmes qui permet de caractériser le comportement asymptotique du maximum d'un échantillon et de dépassement au-dessus d'un seuil. La loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV, Generalized Extreme Value distribution) (Fisher & Tippett, 1928 ; Gnedenko, 1943 ; Jenkinson, 1955) et la loi de Pareto généralisé (Pickands, 1975) sont les deux lois statistiques souvent utilisées dans ce contexte en hydrologie.
2. les modèles probabilistes simplifiés pluie-débit tels la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967), développé par EDF (Electricité de France). Cette méthode permet d'extrapoler la distribution de fréquence des débits à partir de celle des pluies. Depuis 2007, c'est la méthode SCHADEX (Paquet *et al.*, 2013) qui fait désormais référence à EDF. SCHADEX est une méthode probabiliste de prédétermination de crues extrêmes basée sur des types de temps et un modèle hydrologique conceptuel.
3. les méthodes de couplage d'un simulateur d'averse et d'un modèle pluie-débit tels le modèle SHYPRE (Arnaud & Lavabre, 2000 ; Arnaud & Lavabre, 2002 ; Cernesson *et al.*, 1996 ; Lavabre *et al.*, 1999) qui permet de générer de très longues chroniques de pluies horaires à partir d'hypothèses sur la structuration des averses et les lois de probabilités sous-jacentes. Ces méthodes permettent de caractériser

la distribution de fréquence des pluies sans supposer une loi de probabilité particulière. La réponse hydrologique aux pluies simulées est caractérisée en utilisant un modèle pluie-débit.

L'ensemble de ces méthodes a été synthétisé dans le projet ExtraFlo portant sur l'estimation des pluies et crues extrêmes en France (Lang *et al.*, 2014). En raison de la faible quantité de données existantes en Haïti, des méthodes classiques qui ont besoin de peu de données par rapport aux autres méthodes ont été utilisées dans cette étude. Ainsi, les lois statistiques Gumbel (Gumbel, 1958) et GEV (Beirlant *et al.*, 2004; Coles, 2001; Jenkinson, 1955) et la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967) ont été utilisées pour estimer les valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour pour chacun des 21 bassins versants étudiés.

5.2 Analyse des pluies et débits des bassins versants haïtiens

5.2.1 Objectifs de cette partie

Cette section propose d'analyser les pluies et les débits en Haïti sur la période 1920-1940 à partir de la base de données hydrométéorologiques Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a) décrite dans le chapitre 4, en se concentrant d'abord sur la variabilité spatio-temporelle des régimes et des moyennes annuelles des valeurs de pluies et de débits. Ensuite, les épisodes de fortes pluies ont été analysés en étudiant premièrement les événements marquants tels que les cyclones identifiés sur la période 1920-1940 et les deux années de fortes sécheresses identifiées par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017). Ensuite, un ensemble d'épisodes pluvieux forts a été identifié automatiquement avant d'être analysé.

5.2.2 Données utilisées

Les données hydrométéorologiques utilisées dans cette étude sont les séries de pluies et de débits journalières, disponibles sur la période 1920-1940, de 21 bassins versants haïtiens issues de la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a). Une série de pluie et quatre séries de débits, dont une série de débits observés et trois séries de débits simulés sont disponibles pour chaque bassin versant (voir la section 4.7.4).

En plus des données hydrométéorologiques, des informations concernant les cyclones identifiés sur la période 1920-1940 répertoriés dans la base de données de la NOAA¹ ainsi que des informations (zones impactées) liées aux deux années de fortes sécheresses (1921 et 1922) identifiées par le BRGM (voir la section 1.3.2) ont aussi été utilisées.

5.2.3 Méthodologie

5.2.3.1 Comparaison des débits simulés aux débits observés

Les séries de débits observés étant lacunaires, des séries de débits simulés sont utilisées dans cette étude. Ainsi, cette section se propose de comparer les trois séries de débits simulés aux débits observés afin de faire le choix des séries de débits simulés à utiliser.

Les ratios entre les débits mensuels observés et les débits mensuels simulés ont été calculés pour chacune des trois séries de débits simulés. Ces ratios permettent d'évaluer la capacité des débits simulés à bien représenter les débits moyens. Ensuite, les ratios des quantiles 90%, 95%, 99% entre les débits observés et simulés ont été calculés. Enfin, les ratios des maximums annuels (un ratio par an et par bassin versant) et des maximums absolus (quantile 100%; un ratio par bassin versant) entre les débits observés et les débits simulés ont été calculés. Ces ratios permettent d'évaluer la capacité des débits simulés à bien représenter les forts débits. La série de débits qui représente le mieux les débits observés parmi les trois séries de débits simulés sera utilisée comme série de débits de référence dans la suite de cette étude.

1. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>, consulté le 16 octobre 2023.

5.2.3.2 Variabilité interannuelle et infra-annuelle des pluies et des débits

Les valeurs moyennes annuelles des pluies et des débits ont été calculées pour les 21 bassins versants étudiés. Les cumuls annuels (pluies et débits) sont par la suite représentés pour chacune des années de la période d'étude (1920-1940) dans le but d'étudier leurs évolutions temporelles. Les régimes des pluies et des débits ont aussi été calculés pour chacun des bassins versants.

5.2.3.3 Analyse des cyclones sur la période 1920-1940

Les cumuls des pluies et les débits journaliers maximum associés aux 24 cyclones identifiés dans la base de données de la NOAA ont été calculés. Ces épisodes de pluies en période cyclonique ont des durées de 2 à 4 jours suivant les informations de la base de données de la NOAA.

5.2.3.4 Analyse des deux années de fortes sécheresses (1921 et 1922)

Les normales de pluies mensuelles ont été calculées sur la période 1920-1940. Ensuite, les pourcentages de pluies par rapport aux valeurs normales ont été calculés pour chacun des 24 mois des deux années de sécheresses (1921 et 1922). Ces pourcentages par rapport aux valeurs normales permettent : (i) de voir si les séries de pluies à l'échelle des bassins versants ont bien capturé ces événements secs (pourcentages négatifs) et (ii) d'évaluer l'intensité de ces événements de sécheresses (plus le pourcentage de la pluie par rapport à la normale est négatif plus la sécheresse est intense).

5.2.3.5 Caractérisation des épisodes de fortes pluies et les débits associés par bassin versant

Un seuil à partir duquel un épisode de pluies est considéré comme un épisode de fortes pluies a été défini afin d'identifier des épisodes de fortes pluies, et de caractériser leurs cumuls, leurs durées, leurs variabilités spatio-temporelles et les débits maximum générés. Ce seuil (un seuil unique pour tous les bassins versants) est discuté dans la section *résultats* (section 5.2.4.4), et a été défini en fonction des cumuls de pluies obtenus pour les épisodes pluvieux liés aux cyclones.

Nous avons défini un épisode pluvieux en fonction de trois paramètres : sa date de début, sa date de fin et un intervalle de temps minimal garantissant l'indépendance entre deux épisodes de pluies. Ainsi, un épisode pluvieux commence au pas de temps où la pluie est non nulle et nulle au pas de temps précédent (la pluie dont on parle est la pluie de bassin versant). Un épisode pluvieux prend fin au pas de temps où la pluie est non nulle et nulle au pas de temps suivant. La pluie nulle est considérée comme une pluie inférieure à 1 mm/j. Deux épisodes pluvieux dont l'intervalle de temps séparant la fin du premier et le début du deuxième est inférieur à deux jours sont fusionnés en un seul épisode pluvieux.

Le nombre d'épisodes de fortes pluies par bassin versant, la saisonnalité ainsi que l'évolution temporelle du nombre d'épisode par année ont été étudiées. L'évolution temporelle des durées et des cumuls des épisodes de fortes pluies et la corrélation entre les cumuls de pluies et les débits maximums générés ont également été étudiées.

5.2.4 Résultats

5.2.4.1 Comparaison des débits simulés aux débits observés

La figure 5.1 résume la capacité des débits simulés (Q_1 , Q_2 , et Q_3 qui représentent les débits simulés avec les trois jeux de paramètres de la base de données Simbi) à représenter les débits observés sur les 21 bassins versants étudiés. Un ratio supérieur à 1 représente une surestimation des débits observés et un ratio inférieur à 1 représente une sous-estimation des débits observés. Dans l'ensemble, les débits simulés Q_1 , Q_2 , et Q_3 surestiment les valeurs moyennes (points rouges) des débits mensuels pour chacun des 12 mois (voir le

graphique du haut de la figure 5.1). Par contre, il y un fort décalage, principalement en période hivernale (WDS et correspond à la période sèche en Haïti : voir la section 3.2.1.1), entre les valeurs moyennes (points rouges) et les valeurs médianes (lignes noires horizontales) des boîtes à moustaches. Ce fort décalage montre que, pour certains mois, principalement en hiver, les ratios des débits observés et simulés obtenus sont très élevés, ce qui montre que les débits simulés ont des difficultés à bien représenter les faibles débits. En effet, les débits simulés ont du mal à bien représenter les débits observés proches de zéro, ce qui conduit à des ratios très élevés. Les ratio médians (lignes horizontales noires) oscillent autour de la valeur optimale 1, ce qui montre que les débits ont été bien simulés pour près de la moitié des mois étudiés.

Les débits simulés arrivent à mieux représenter les forts débits, avec des ratios très centrés autour de la valeur optimale 1 (voir le graphique du bas de la figure 5.1). Néanmoins, on observe une tendance à la surestimation des quantiles de forts débits et des débits maximums annuels, sauf pour le quantile 100% (maximums des débits), pour lequel on observe une sous-estimation.

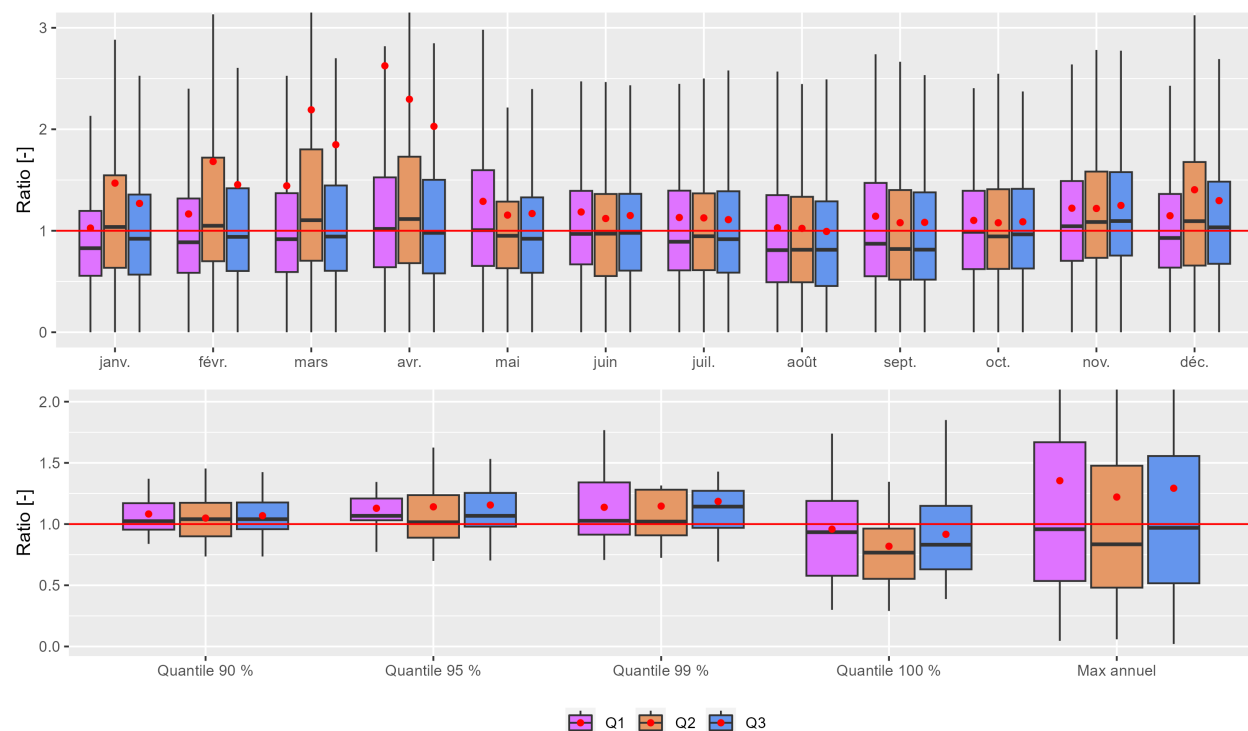


FIGURE 5.1 – Ratios des débits mensuels simulés et observés sous forme de boîtes à moustaches. Chaque boîte à moustaches présente les ratios de l'ensemble des 21 bassins versants. La figure du haut présente les ratios pour chacun des 12 mois et celle du bas les présente pour certains quantiles et les débits journaliers maximums annuels. Les points rouges représentent les valeurs moyennes. Q1, Q2 et Q3 représentent les trois séries de débits simulés de la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a).

Il y n'y a pas de tendance claire en terme de meilleures performances entre les trois séries de débits simulés (Q1, Q2 et Q3). De ce fait, seules les séries de débits simulés Q3 (débits simulés avec les paramètres calés sur toute la période 1920-1940) seront utilisés dans la suite de cette étude.

5.2.4.2 Régimes des pluies et des débits

Le régime des pluies de chaque bassin versant est présenté à la figure 5.2. Les quatre saisons des pluies caribéennes (WDS, ERS, MSD et LRS : voir la section 3.2.1.1) sont représentées dans les régimes de tous les bassins versants. Cependant, deux types de régimes de pluies sont observés : un régime de pluie bimodal et un régime de pluie unimodal. Le régime de pluie bimodal, bien connu en Haïti où une saison moins pluvieuse

(MSD) est intercalée entre deux saisons de fortes pluies (ERS et LRS), est observé pour 16 des 21 bassins versants. Un second régime de pluie unimodal est observé pour les cinq autres bassins versants qui sont d'ailleurs proches, et situés au nord de Port-au-Prince (Q-004, Q-006, Q-044, Q-052, Q-058) pour lesquels la saison de pluie en été (MSD) a une intensité de pluie équivalente à l'ERS ou à la LRS, ce qui donne l'impression que ces bassins versants sont soumis à une seule et longue saison de pluie à partir de fin avril jusqu'en novembre.

Les mois d'avril et d'août sont deux mois de transitions d'une saison moins pluvieuse à une saison plus humide, c'est ce qui justifie que la pluie en avril (respectivement en août) est supérieure à celle des autres mois de la WDS (respectivement de la MSD). Inversement, les mois de juin et de novembre sont deux mois de transitions d'une saison humide à une saison moins pluvieuse, voire sèche. Ainsi, la pluviométrie de juin est donc plus faible que celle de mai et celle de novembre plus faible que celles des autres mois de la LRS.

La figure 5.3 présente les régimes de débits des 21 bassins versants étudiés, avec le même code de couleur fonction des saisons des pluies caribéennes. Le régime de débits en Haïti étant de type pluvial, les régimes de débits reflètent les régimes de pluies. Ainsi, les régimes de débits des bassins versants Q-004, Q-006, Q-052 et Q-058 ont un régime de débits unimodal comme celui des pluies associées. Les autres bassins versants ont un régime de débits bimodal. Néanmoins, les deux pics de débits pendant l'ERS et la LRS ne sont pas aussi bien marqués que les pics de pluies pour certains bassins versants. Par exemple, les pics de débits du bassin versant Q-045 sont peu visibles à cause des débits relativement faibles toute l'année. Par contre, un zoom sur ce bassin versant mettra bien en évidence le régime bimodal des débits.

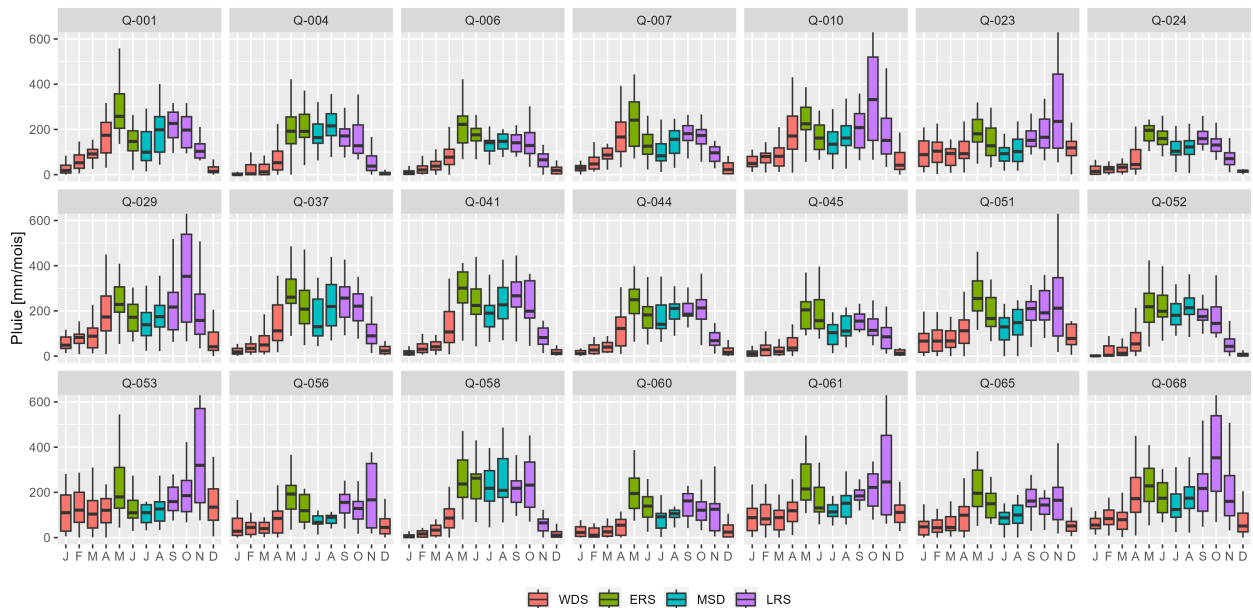


FIGURE 5.2 – Régimes des pluies sous forme de boîtes à moustaches (les hauteurs des boîtes représentent les quantiles 25% et 75%) calculées avec les données de Simbi sur la période 1920-1940.

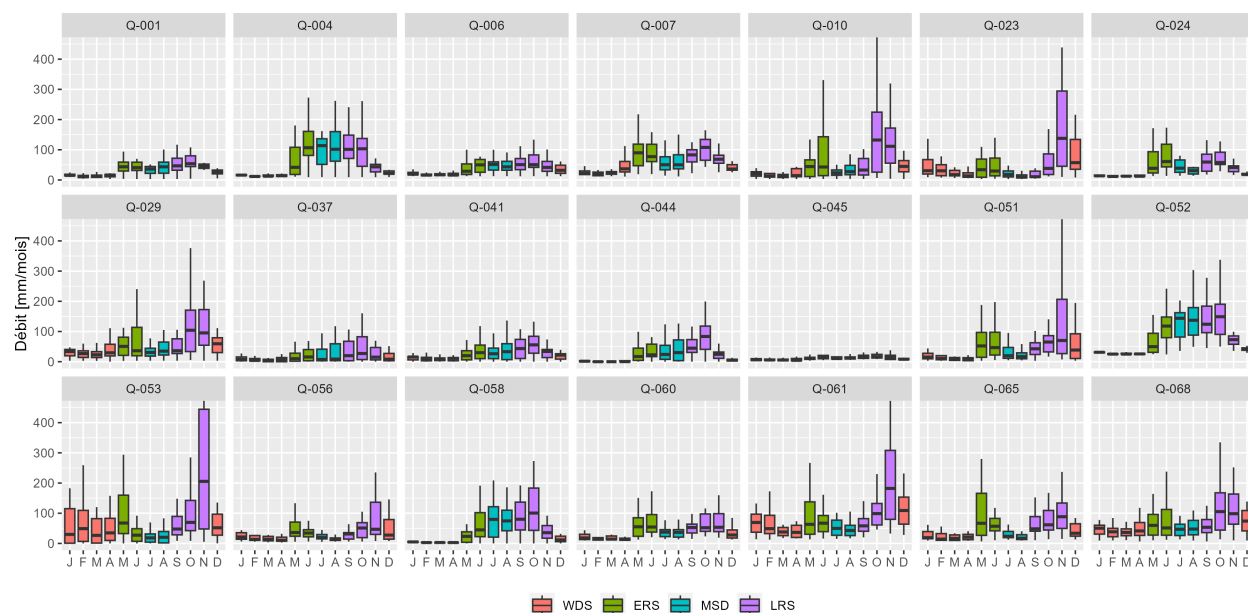


FIGURE 5.3 – Régimes des débits (débits simulés Q3) sous forme de boîtes à moustaches (les hauteurs des boîtes représentent les quantiles 25% et 75%) calculées avec les données de Simbi sur la période 1920-1940.

5.2.4.3 Analyse des pluies et des débits moyens annuels

La figure 5.4 présente les pluies moyennes annuelles (à gauche) et les débits moyens annuels (à droite) des 21 bassins versants étudiés. Les pluies et les débits moyens annuels ont une variabilité spatiale similaire, avec des valeurs très élevées pour les bassins versants situés au sud-ouest d’Haïti et des valeurs relativement faibles dans le nord-est et la partie centrale d’Haïti.

La figure 5.5 présente la variabilité interannuelle des cumuls annuels des pluies des 21 bassins versants étudiés. Une période relativement sèche est observée sur la plupart des bassins versants entre 1920 et 1925. Cette période sèche est très marquée pour près de 7 bassins versants (Q-010, Q-029, Q-037, Q-041, Q-044, Q-058 et Q-068), et qui ne sont pas proches géographiquement. Ces résultats sont cohérents avec les deux années de fortes sécheresses (1921 et 1922) sur tout le territoire haïtien, mentionnées par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017). Une période plus ou moins humide est observée entre 1925 et 1935 pour certains bassins versants. Ces bassins versants humides sont pour la plupart localisés dans le sud-ouest d’Haïti (Q-068, Q-029 et Q-010) et dans la partie centrale (Q-004, Q-037, Q-041, Q-044 et Q-058). La variation du débit annuel suit le même schéma temporel que celle de la pluie, elle n’est donc pas présentée ici.

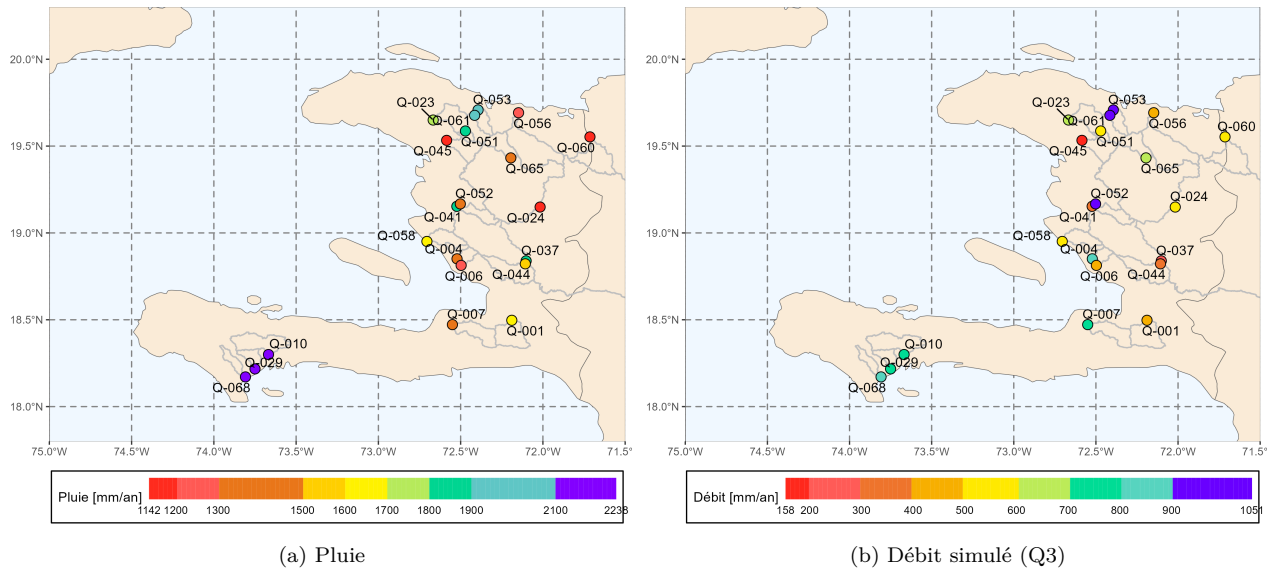


FIGURE 5.4 – Représentation des pluies moyennes annuelles à gauche, et des débits moyens annuels à droite calculés avec les données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a) sur la période 1920-1940. Les séries de débits utilisées sont celles calculées avec les paramètres du modèle GR4J calibrés sur toute la période de données disponibles (Q3).

5.2.4.4 Analyse des cyclones identifiés pendant la période 1920-1940

La figure 5.6 présente les cumuls de pluies et les débits maximum journaliers associés aux 24 cyclones identifiés sur la période 1920-1940. Parmi ces cyclones, 12 sont des tempêtes tropicales, sept sont des cyclones de catégories 1, deux sont des cyclones de catégories 3 et trois sont des cyclones de catégories 4. Selon les résultats présentés à la figure 5.6, il n’y a pas de corrélation entre les catégories des cyclones et les pluies générées. Parmi ces 24 cyclones, deux ont généré des débits relativement élevés : ce sont les cyclones du 7 au 11 novembre 1924 et du 21 au 24 octobre 1935. Le cyclone d’octobre 1935, dont le débit maximum est le plus élevé, est identifié comme le seul évènement cyclonique meurtrier pendant la période 1920-1940 selon la liste du BRGM (voir le tableau 1.1). Ce cyclone, qui a causé la mort de plus de 2000 personnes, fait d’ailleurs partie des cyclones les plus meurtriers qu’a connu Haïti.



FIGURE 5.5 – Représentation de la variabilité interannuelle des cumuls annuels des pluies des 21 bassins versants étudiés. La ligne horizontale noire représente la pluie annuelle moyennée sur la période 1920-1940. En bleu, les années pour lesquelles la pluie annuelle est supérieure à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles la pluie annuelle est inférieure à la moyenne.

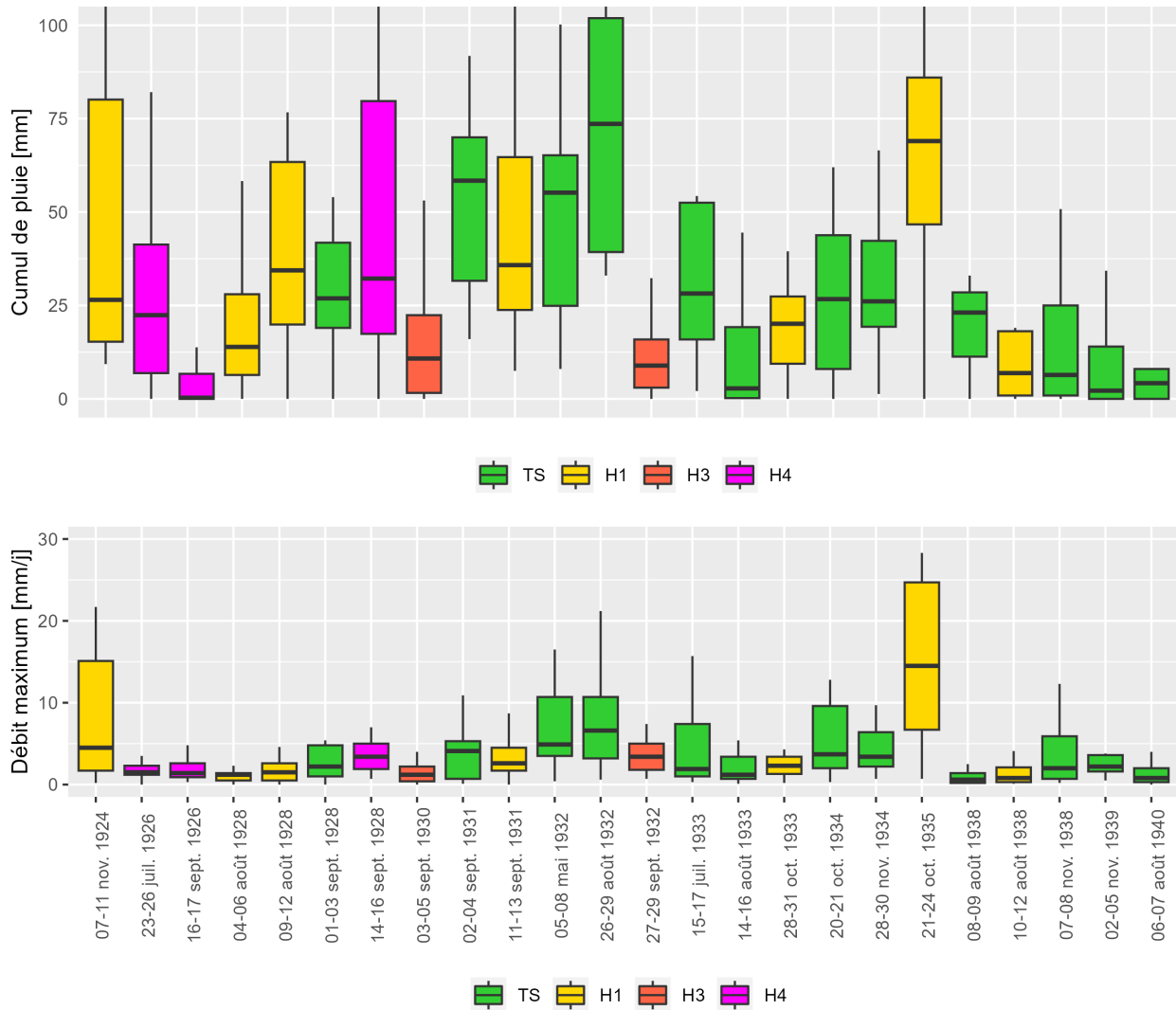


FIGURE 5.6 – Cumuls des pluies et débits maximum journaliers associés aux 24 cyclones identifiés sur la période 1920-1940 sous forme de boîtes à moustaches (les hauteurs des boîtes représentent les quantiles 25% et 75%). Chaque boîte à moustaches représente l'ensemble des cumuls de pluies ou débits maximum des 21 bassins versants pour un cyclone donné. Les couleurs représentent les catégories des cyclones : TS pour tempête tropicale, H1 à H4 représente les cyclones de niveau 1 à 4.

5.2.4.5 Analyse des fortes sécheresses identifiées en 1921 et 1922

La figure 5.7 présente les pourcentages de pluies par rapport à la normale (calculée sur la période 1920-1940) de chacun des 24 mois des années 1921 et 1922. Les points rouges représentent les mois où la pluie est inférieure à la normale, et plus le rouge est foncé plus le mois en question est sec. Les résultats montrent que les deux saisons de pluies MSD et LRS (de juillet à novembre) se sont révélées être inférieures à la normale pour la plupart des bassins versants, principalement ceux situés dans le sud d'Haïti. Les mois de janvier, mars et avril 1922 ont été très secs avec des pluies quasi-nulles (pourcentage proche de -100%) pour la plupart des bassins versants. De plus, les mois généralement pluvieux (mai, octobre et novembre) sont très en dessous de la normale, avec des pourcentages par rapport à la normale proche de -75%. Cette baisse de pluie pendant les mois qui sont généralement humides pendant deux années consécutives a donc fortement contribué à la sécheresse des années 1921 et 1922 (sans oublier qu'à cette époque, il n'y avait peu ou pas d'infrastructures de retenue d'eau en Haïti).

5.2. ANALYSE DES PLUIES ET DÉBITS DES BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

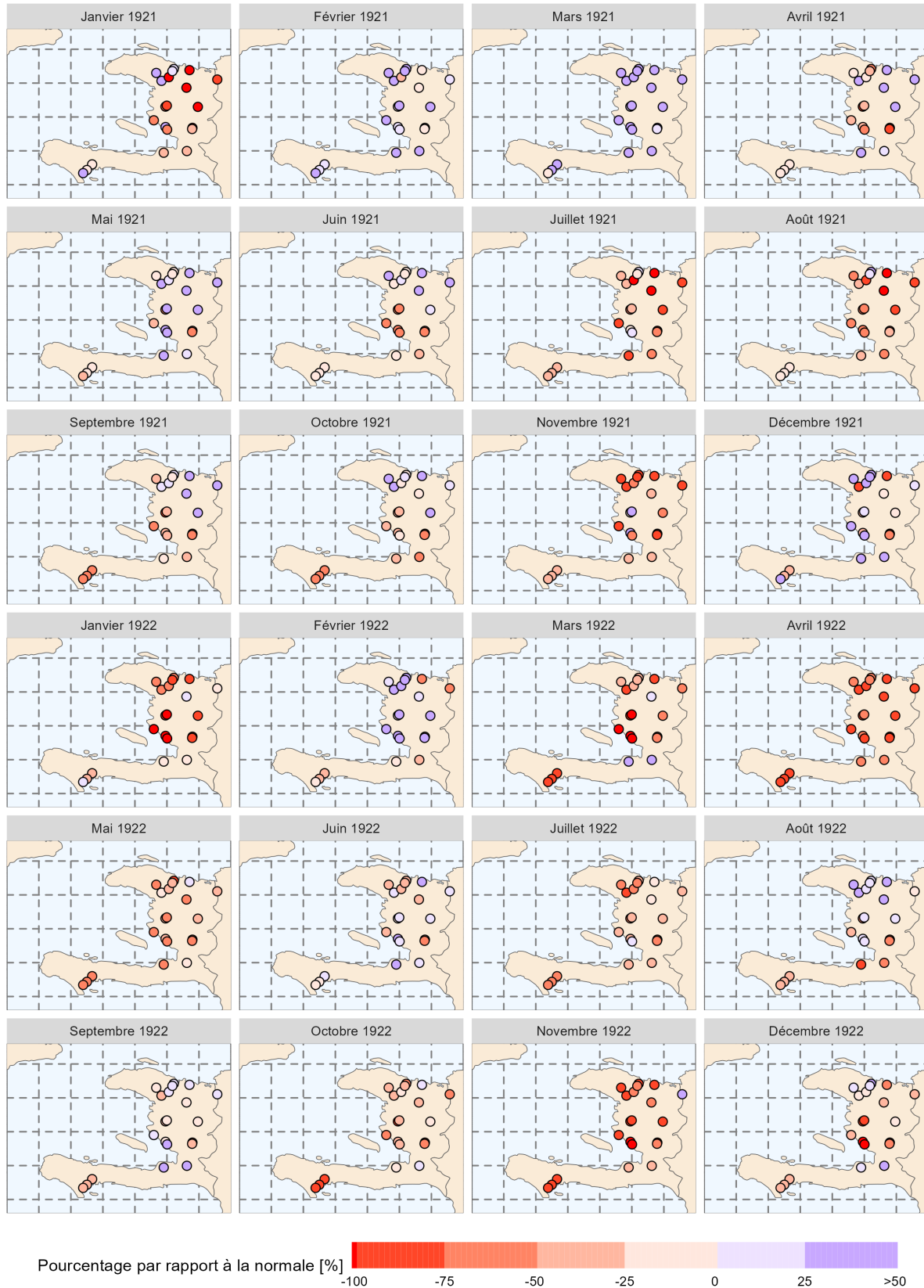


FIGURE 5.7 – Pourcentages de pluies par la rapport à la normale (calculée sur la période 1920-1940 avec les données Simbi) de chacun des 24 mois de 1921 et 1922.

5.2.4.6 Analyse du nombre d'épisodes de fortes pluies

Après avoir analysé les pluies et débits associés aux cyclones, une liste supplémentaire d'épisodes de fortes pluies a été constituée. En fonction des cumuls de pluies obtenus pour les événements cycloniques et principalement celui d'octobre 1935 qui a conduit à des inondations meurtrières, le seuil à partir duquel un épisode de pluie est considéré comme fort a été fixé à 50 mm. Ainsi, les épisodes de fortes pluies tels que définis dans cette section, sont des épisodes de pluies dont les cumuls de pluies à l'échelle des bassins versants sont supérieurs à 50 mm. Entre 100 et 250 épisodes de pluies ayant des cumuls supérieurs à 50 mm ont été ainsi identifiés entre 1920 et 1940 pour les 21 bassins versants étudiés (voir la figure 5.8). Le nombre d'épisodes de fortes pluies, comme pour la pluie moyenne annuelle présentée à la figure 5.4, est plus élevé pour les bassins versants du sud-ouest et quelques bassins versants du nord-ouest, avec une fréquence de plus de 10 épisodes de fortes pluies par année. La fréquence de ces épisodes de fortes pluies est deux fois moins importante dans le nord-est, et un peu plus de 7 épisodes de fortes pluies par an ont été observés dans la partie centrale d'Haïti.

La saisonnalité des épisodes de fortes pluies, présentée à la figure 5.9 pour chaque bassin versant, est fortement corrélée aux régimes de pluies, avec des épisodes de pluies très fréquents pendant les saisons ERS, MSD LRS, et un peu moins fréquent pendant la saison WDS (saison hivernale sèche). Néanmoins, pour certains bassins versants, principalement ceux du nord-ouest d'Haïti (Q-023, Q-051, Q-053 et Q-061), les épisodes de fortes pluies sont présents toute l'année.

La figure 5.10 présente l'évolution temporelle du nombre des épisodes de fortes pluies entre 1920 et 1940 pour les 21 bassins versants étudiés. Six des sept bassins versants qui ont été très affectés par la période sèche de 1920 à 1925 ont un nombre d'épisodes de fortes pluies très faible pendant cette période de sécheresse. Par contre, le bassin versant Q-068, situé dans le sud-ouest et très affecté par la sécheresse des années 1920, a quand même une fréquence de plus de 5 épisodes de pluies par année. Pendant la période humide de 1925 à 1935, le nombre d'épisode de fortes pluies est très élevé et atteint parfois 15 épisodes de fortes pluies pour certains bassins versants.

5.2.4.7 Analyse des cumuls et des durées des épisodes de fortes pluies

Les durées et les cumuls des épisodes de fortes pluies présentés à la figure 5.11 et à la figure 5.12 ne semblent montrer de tendance particulière sur la période 1920-1940. Néanmoins, on peut remarquer que les durées des épisodes de fortes pluies et par conséquent leurs cumuls semblent plus élevés à partir de 1930 pour certains bassins versants.

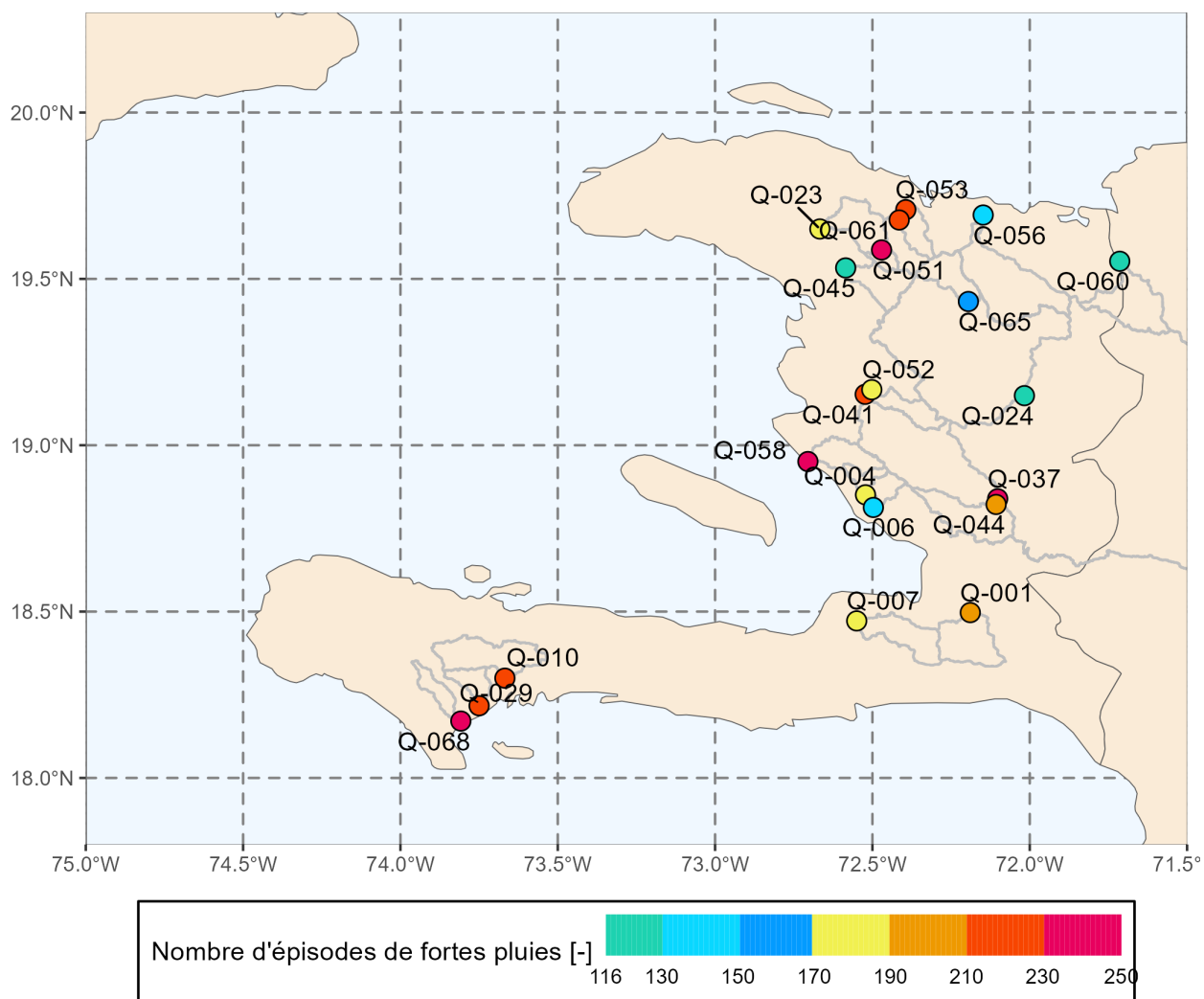


FIGURE 5.8 – Nombre d'épisodes pluvieux dont les cumuls de pluies sont supérieurs à 50 mm pour les 21 bassins versants. Les épisodes de pluies sont calculés sur la période 1920-1940 avec les données de Simbi.

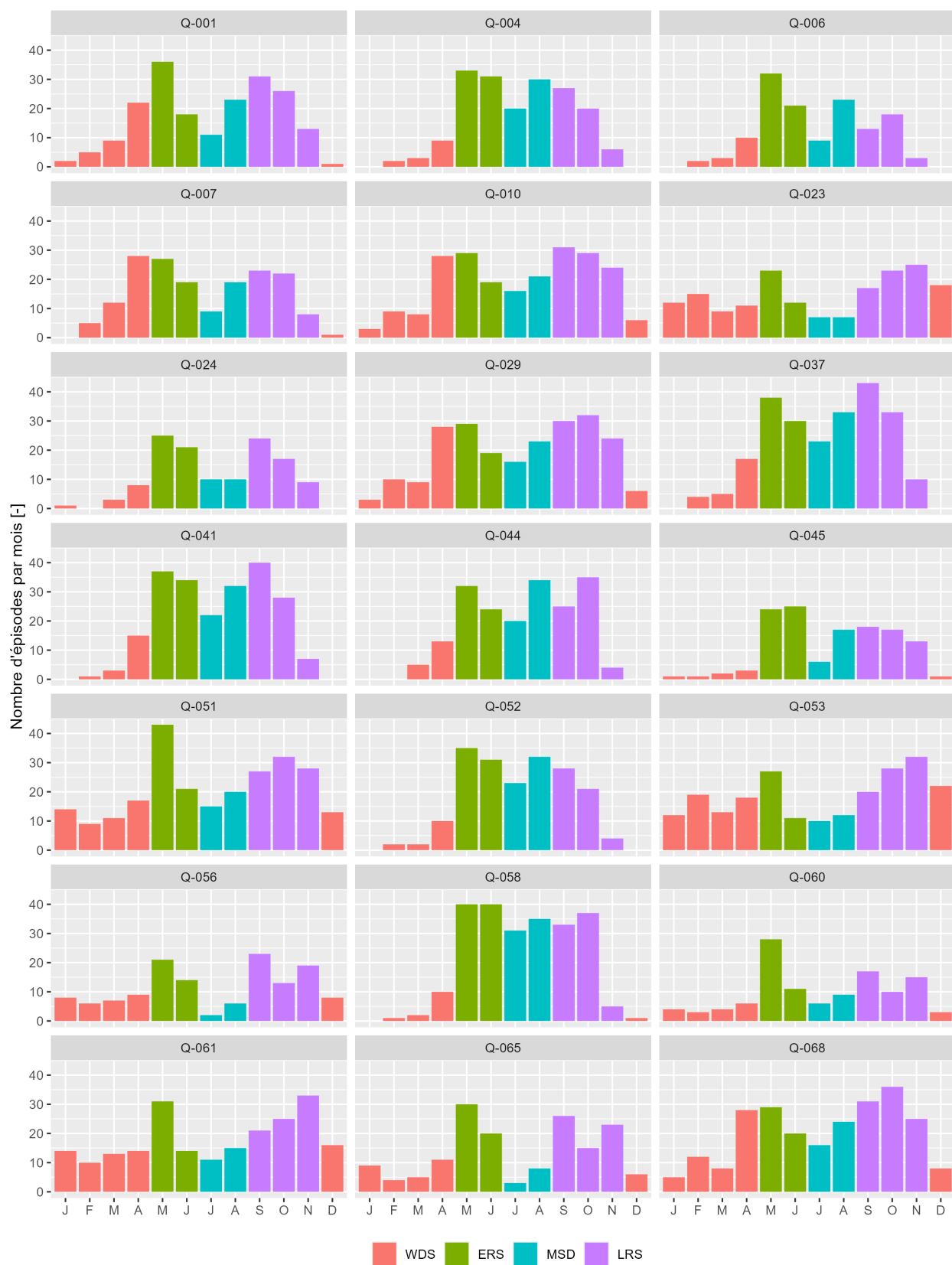


FIGURE 5.9 – Nombre d'épisodes pluvieux dont les cumuls de pluies sont supérieurs à 50 mm par mois pour les 21 bassins versants. Les couleurs représentent les quatre saisons de pluies caribéennes (voir la section 3.2.1.1). Les épisodes de pluies sont calculés sur la période 1920-1940 avec les données de Simbi.

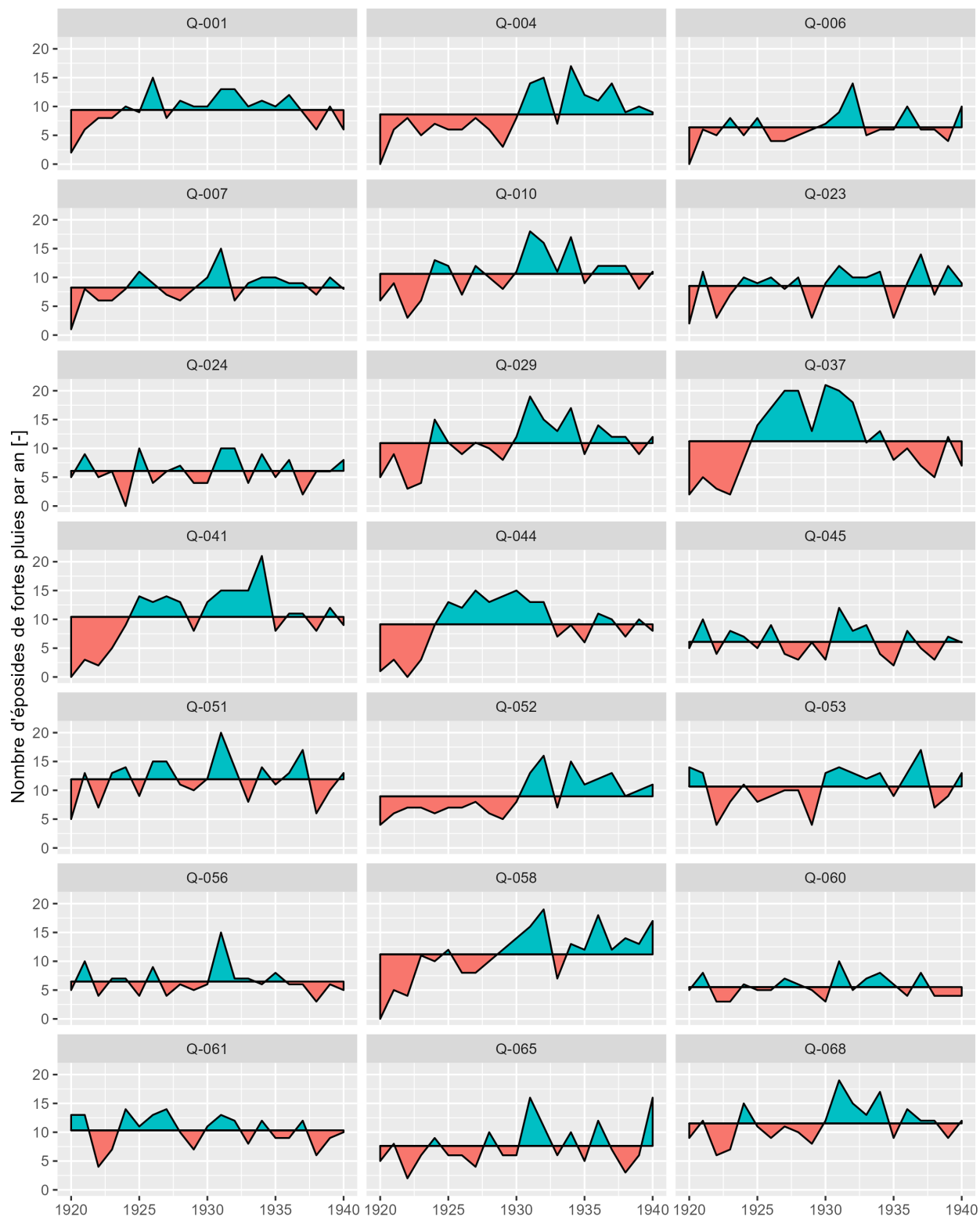


FIGURE 5.10 – Variabilité interannuelle du nombre d'épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940 pour les 21 bassins versants étudiés. La ligne horizontale noire représente le nombre moyen d'épisodes de fortes pluies par an sur la période 1920-1940. En bleu, les années pour lesquelles le nombre d'épisodes est supérieur à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles le nombre d'épisodes est inférieur à la moyenne.



FIGURE 5.11 – Variabilité interannuelle de la durée moyenne des épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940 pour les 21 bassins versants étudiés. La ligne horizontale noire représente la durée moyenne des épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940. En bleu, les années pour lesquelles la durée (durée moyenne par an) des épisodes est supérieure à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles la durée (durée moyenne par an) des épisodes est inférieure à la moyenne.



FIGURE 5.12 – Variabilité interannuelle des cumuls des épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940 pour les 21 bassins versants étudiés. La ligne horizontale noire représente le cumul moyen des épisodes de fortes pluies sur la période 1920-1940. En bleu, les années pour lesquelles le cumul (cumul moyen par an) des épisodes est supérieur à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles le cumul (cumul moyen par an) des épisodes est inférieur à la moyenne.

5.2.4.8 Corrélation entre les épisodes de fortes pluies et les débits associés

La figure 5.13 présente la corrélation entre les épisodes de fortes pluies (cumuls des pluies) et les débits maximum journaliers pour les 21 bassins versants étudiés. Les résultats de la figure 5.13 montrent que les débits générés par des pluies fortes sont fortement corrélés aux cumuls de pluies, ce qui montre que les débits simulés Q3 ont bien capturé les crues associées aux fortes pluies. Ainsi, certains épisodes dont les cumuls de pluies sont autour de 650-800 mm peuvent générer des débits supérieurs à 150 mm/j.

La figure 5.14 présente les ratios entre les volumes d’eaux ruisselées en mm et les cumuls de pluies en fonction des cumuls de pluies. Les résultats montrent que les ratios sont positivement corrélés aux cumuls de pluies. Cependant, pour certains bassins versants (Q-004, Q-010 et Q-052), les ratios sont supérieurs à 1, or ces bassins versants sont situés sur des formations carbonatés et/ou karstiques. Ces ratios élevés peuvent donc être justifiés par des contributions des bassins versants voisins. Malheureusement, comme discuté à la section 4.8.3, peu d’études ont été réalisées permettant de confirmer ou de réfuter cette hypothèse.

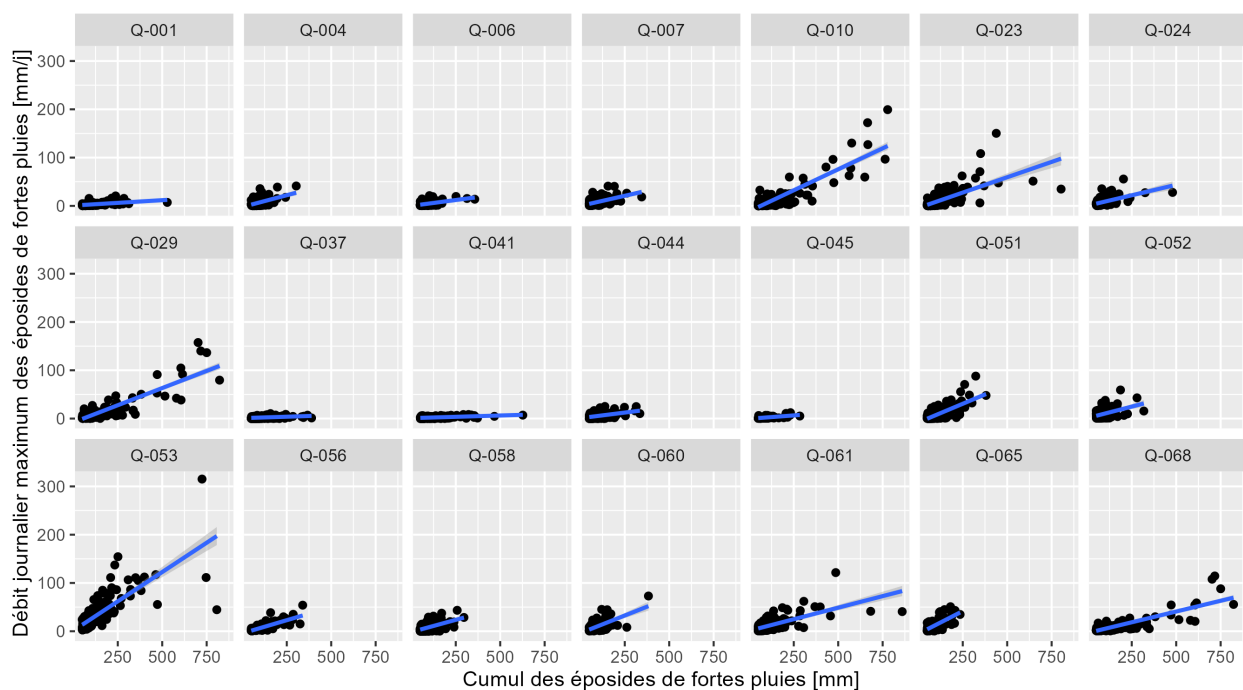


FIGURE 5.13 – Débits maximum journaliers en fonction des cumuls des pluies de chacun des épisodes de fortes pluies.

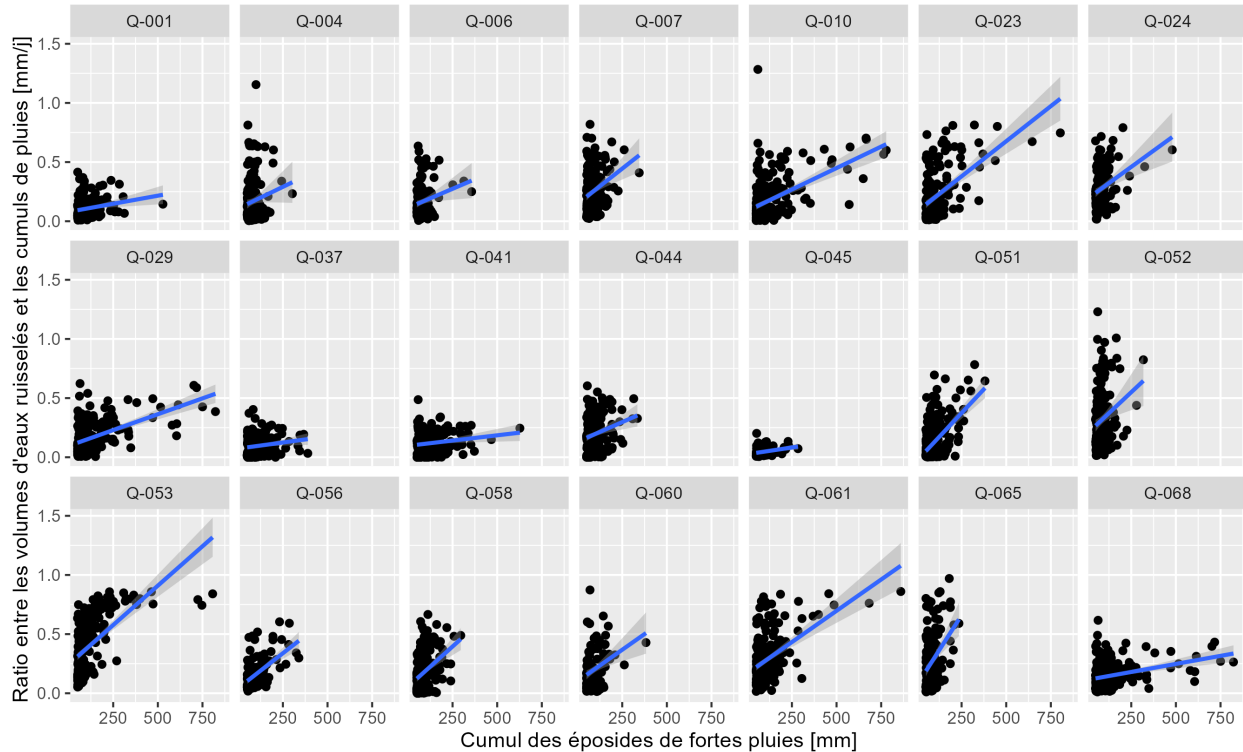


FIGURE 5.14 – Ratios des volumes d’eaux ruisselées et des cumuls des pluies en fonction des cumuls des pluies.

5.3 Analyse fréquentielle de pluies et de débits de 21 bassins versants haïtiens

5.3.1 Objectifs de cette partie

Cette section propose de faire une analyse fréquentielle afin d’estimer des valeurs de pluies et de débits pour les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans pour 21 bassins versants haïtiens à partir des lois statistiques Gumbel (Gumbel, 1958) et GEV (Beirlant *et al.*, 2004; Coles, 2001; Jenkinson, 1955) et la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967).

5.3.2 Données utilisées

Les données hydrométéorologiques utilisées dans cette étude sont présentées à la section 5.2.2, et sont constituées des séries de pluies et de débits (débits observés et simulés) de la base de données Simbi (Bathelémy *et al.*, 2023a), et disponibles sur la période 1920-1940 pour 21 bassins versants haïtiens.

5.3.3 Méthodologie

Trois méthodes sont utilisées pour l’analyse fréquentielle des pluies et des débits : la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV), la distribution de Gumbel et la méthode du Gradex. Les trois méthodes sont utilisées pour l’analyse fréquentielle des débits et seules les deux lois GEV et Gumbel sont utilisées pour l’analyse fréquentielle des pluies. Les paragraphes suivants présentent ces trois méthodes.

TABLEAU 5.1 – Equations analytiques des lois statistiques utilisées pour lesquelles a , b et s sont, respectivement, des paramètres de position, d'échelle et de forme.

Lois statistiques	Équations analytiques
GEV	$G(x) = \exp \left[- \left\{ 1 + \frac{s(x-a)}{b} \right\}^{-\frac{1}{s}} \right]$
Gumbel	$G(x) = \exp \left[- \exp \left\{ -\frac{x-b}{a} \right\} \right]$

5.3.3.1 Lois GEV et de Gumbel

La loi GEV (Beirlant *et al.*, 2004 ; Coles, 2001 ; Jenkinson, 1955) est une famille de lois de probabilité continues à trois paramètres (a , b , et s) utilisée pour s'ajuster à des échantillons de données formés par les maximum annuel (maximums annuels de pluies ou de débits). La distribution de Gumbel (Gumbel, 1958) est un cas particulier de la loi GEV où le paramètre de forme s est nul. Le tableau 5.1 présente les équations analytiques des deux lois statistiques utilisées.

Deux méthodes sont souvent utilisées pour estimer les trois paramètres a , b , et s (Albert, 2018) des lois statistiques : (i) la méthode du maximum de vraisemblance (Prescott & Walden, 1980 ; Smith, 1985), qui consiste à maximiser la fonction de log-vraisemblance, et (ii) la méthode des moments, qui consiste à calculer les trois premiers moments des échantillons de données et de déduire les trois paramètres. La méthode des moments a été utilisée dans notre étude car nos échantillons de données sont relativement petits or la méthode des moments donne de meilleurs résultats pour des échantillons de petites tailles (Lang & Lavabre, 2007 ; Hosking *et al.*, 1985). Les calculs ont été réalisés avec le logiciel R (R Core Team, 2022) et les *packages* EVD (*Extreme Value Distributions* ; Stephenson & Ferro (2022)) et *extRemes* (Gilleland & Katz, 2016).

5.3.3.2 Méthode du Gradex

La méthode du Gradex développée par EDF (Electricité de France ; Guillot & Duband (1967)) a été très utilisée en France pour l'estimation des débits de fréquence rare et exceptionnelle. Cette méthode repose sur deux hypothèses principales. Premièrement, la fréquence des précipitations est supposée être à décroissance exponentielle. Ainsi, les séries de pluies peuvent être ajustées par une loi de Gumbel (Gumbel, 1958) où le paramètre de position a est appelé le Gradex de la distribution (diminutif de gradient exponentiel). La deuxième hypothèse suppose que le déficit d'écoulement, différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau ruisselé, n'augmente plus au-delà d'une certaine valeur de pluie. Ainsi, à partir de ce seuil de pluie, la distribution du débit suit aussi une loi de Gumbel de même Gradex a . L'objectif de la méthode est donc de calculer le Gradex de la distribution de pluie et le seuil (pivot) à partir duquel les distributions de pluies et de débits sont parallèles.

Généralement, les auteurs utilisent une valeur seuil comprise entre le débit décennal et le débit cinquantennal. Dans notre étude, plusieurs tests ont été réalisés avec des débits ayant des périodes de retour de 10, 20, 30, 40 et 50 ans utilisés comme pivot. Ces tests permettent d'analyser la sensibilité des résultats en fonction du pivot et ont permis de choisir un pivot pour la suite de cette étude.

5.3.3.3 Prédétermination des pluies et de débits

Les valeurs de pluies et de débits ont été prédéterminées pour les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans pour chacune des méthodes utilisées. Ensuite, les valeurs minimales et maximales obtenues avec les différentes méthodes ont été utilisées pour définir des plages de valeurs de pluies et de débits pour chaque période de retour étudiée. Cette plage de valeurs est une estimation qualitative de l'incertitude liée au choix d'une loi statistique pour la réalisation de l'analyse fréquentielle.

5.3.4 Résultats et discussions

5.3.4.1 Prédétermination des pluies

La figure 5.15 présente, pour chaque bassin versant, les pluies maximales annuelles observées et les ajustements des lois Gumbel et GEV. Les résultats montrent que les ajustements Gumbel et GEV semblent être cohérents avec la distribution des pluies observées pour plus de 13 des 21 bassins versants. Les valeurs de pluie obtenues avec les deux lois GEV et Gumbel sont très proches pour les bassins versants dont les ajustements sont cohérents. La loi de Gumbel est peu sensible aux “outliers” (les quelques points qui s’éloignent de la droite de Gumbel). Par contre, la loi GEV est très sensible aux “outliers”, ce qui conduit généralement à des valeurs de pluies GEV plus élevées que celles de Gumbel pour les bassins versants avec un ou plusieurs “outliers” (Q-004, Q-023, Q-045, Q-051, Q-053, Q-068).

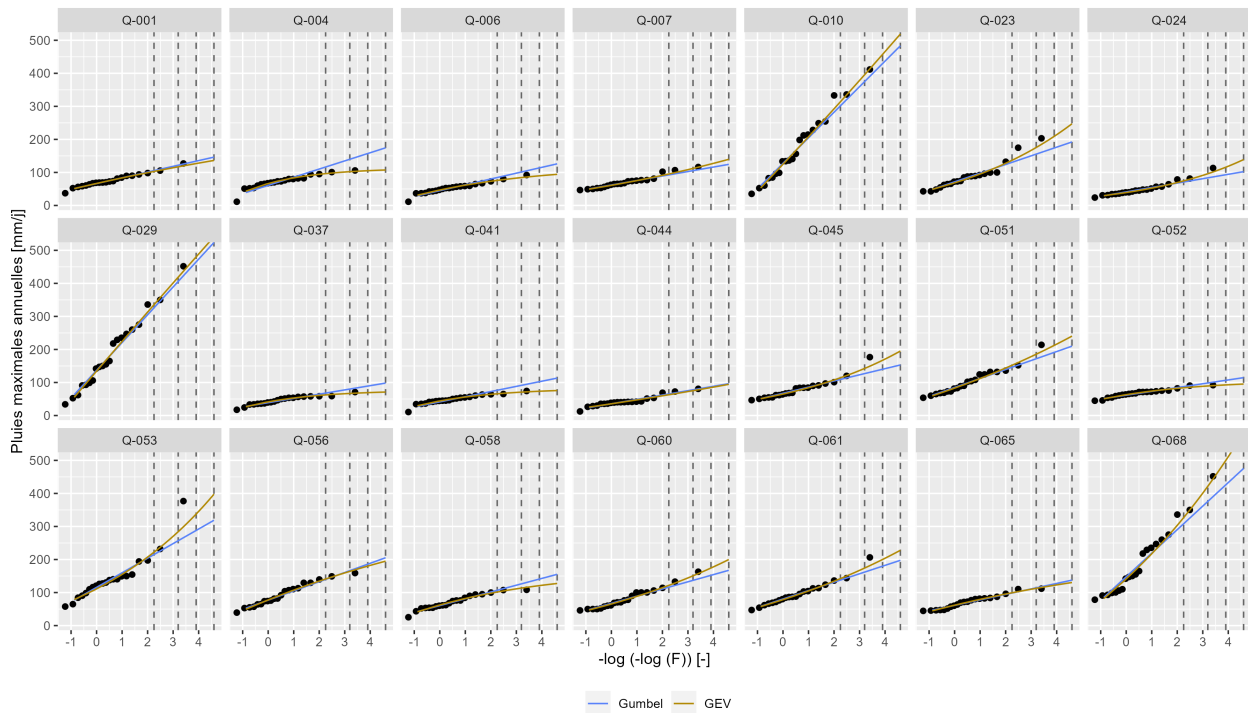


FIGURE 5.15 – Pluies maximales annuelles (points noirs) et ajustement des lois statistiques Gumbel et GEV pour chacun des 21 bassins versants sur la période 1920-1940. Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans.

La figure 5.16 présente les plages de valeurs des fortes pluies des 21 bassins versants étudiés. Ces plages de valeurs sont calculées avec les valeurs minimales et maximales des pluies obtenues avec les deux lois utilisées. Les résultats montrent que les plages de valeurs sont très faibles pour les faibles périodes de retour (inférieures à 10 ans) et sont plus ou moins élevées au delà de la période de retour de 10 ans.

La figure 5.17 présente les cartes des pluies décennales et centennales en haut et les écarts-types en bas. Les écarts-types qui représentent la dispersion par rapport à la moyenne, ont été calculés avec les valeurs de pluies obtenues avec les lois Gumbel et GEV. Les résultats montrent que la pluie décennale est autour de 300 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour de 10 mm/j), et entre 100 et 200 mm/j ailleurs (avec un écart-type autour de 5 mm/j). La pluie centennale est autour de 500 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour entre 20 et 80 mm/j), et entre 100 et 250 mm/j ailleurs (avec un écart-type autour de 20 mm/j).

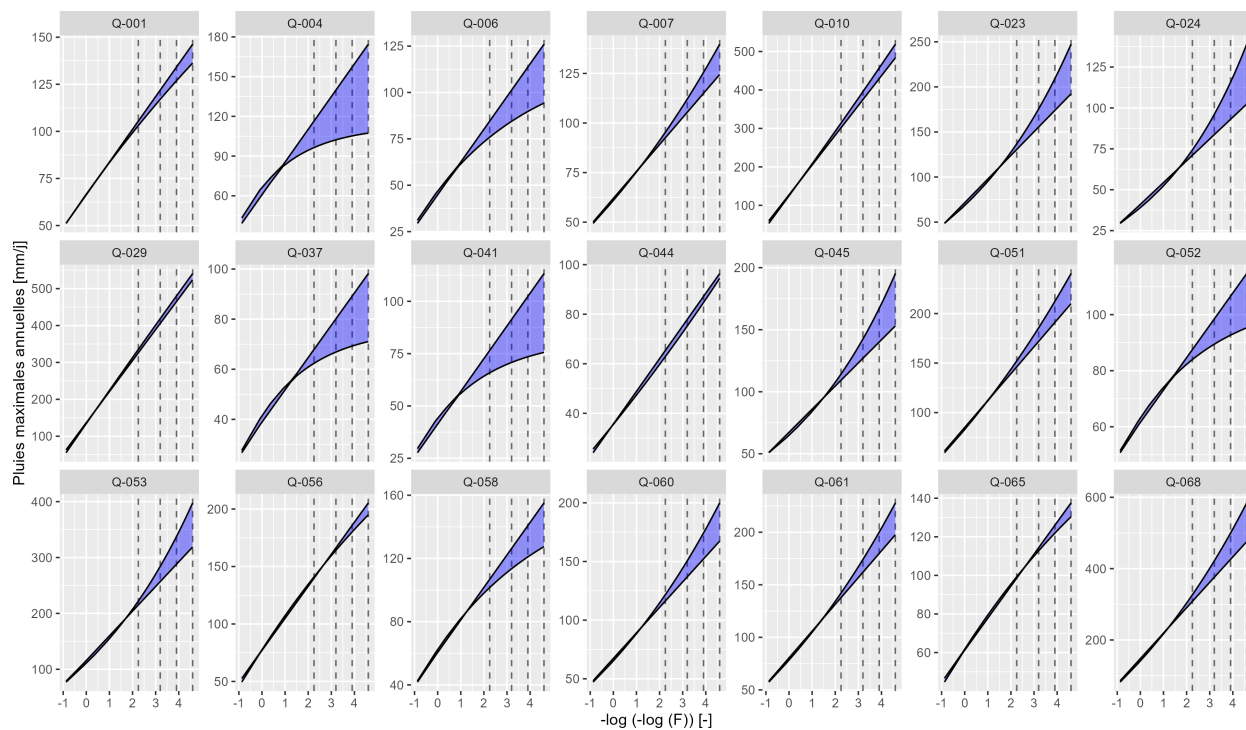


FIGURE 5.16 – Plages de valeurs des pluies calculées avec les valeurs minimales et maximales des pluies obtenues avec les lois Gumbel et GEV (voir la figure 5.15).

5.3.4.2 Choix du pivot à utiliser pour la méthode du Gradex

La figure 5.18 présente les valeurs de débits obtenues pour différents pivots compris entre les débits décennal et cinquantennal. Les résultats montrent que les débits obtenus avec les différents pivots sont proches pour la plupart des bassins versants, notamment pour ceux dont les droites (droites de Gumbel liées aux débits et celles liées aux pluies) ont des pentes proches. Les informations liées aux pluies (Gradex de pluie) semblent être plus importantes pour la prédétermination des débits avec la méthode du Gradex, et les pivots utilisés semblent être secondaires. De ce fait, dans la suite de l'étude, un seul pivot sera utilisé, et ce pivot est choisi comme étant le débit décennal.

5.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

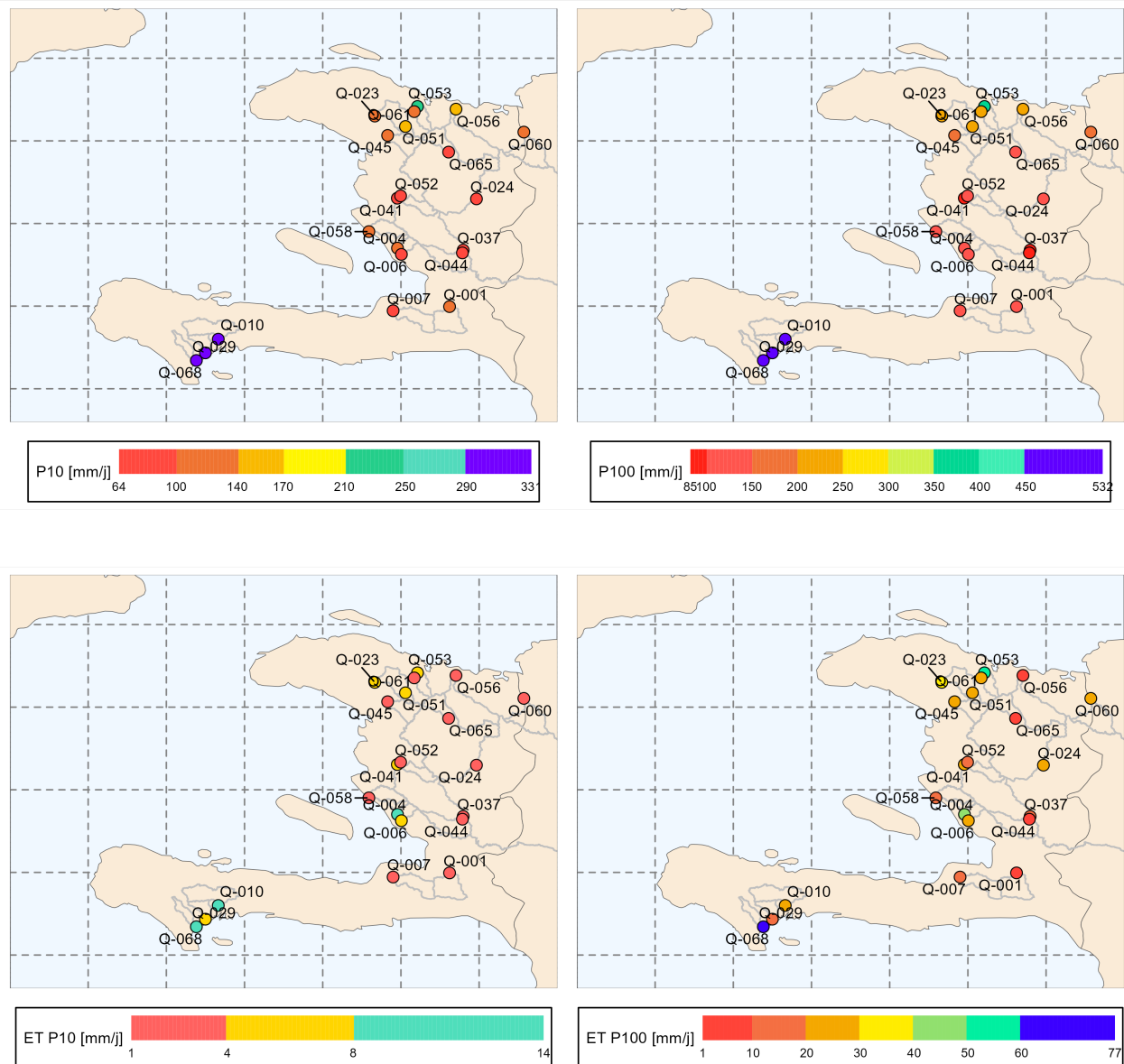


FIGURE 5.17 – En haut : cartes des pluies décennales et centennales pour les 21 bassins versants étudiés sur la période historique (1920-1940). En bas : cartes des écarts-types des pluies décennales et centennales calculés avec les valeurs des pluies obtenues avec Gumbel et GEV.

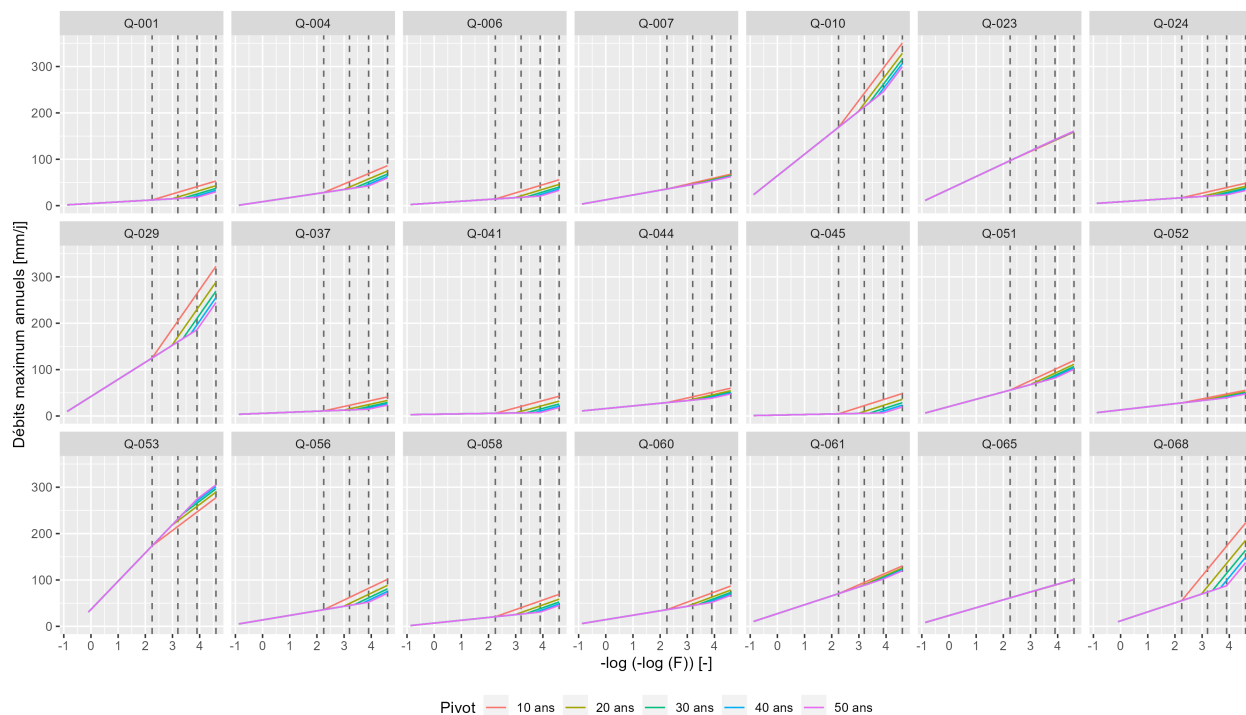


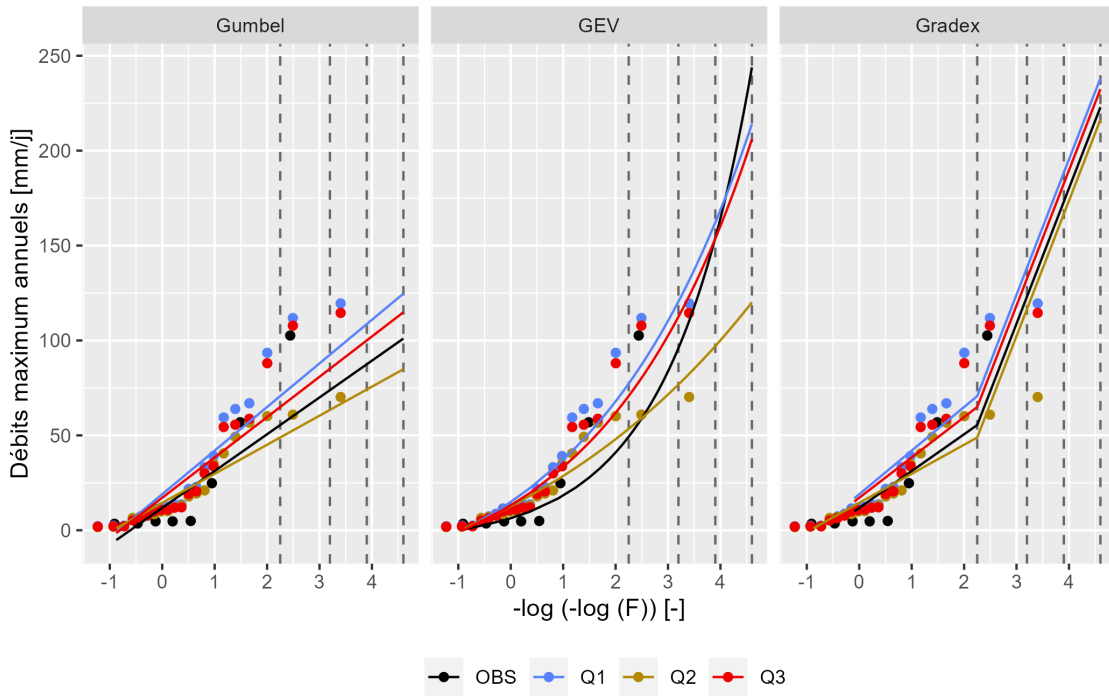
FIGURE 5.18 – Débits obtenus avec la méthode du Gradex pour des pivots compris entre des débits décennal et cinquantennal. Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans.

5.3.4.3 Prédétermination des débits

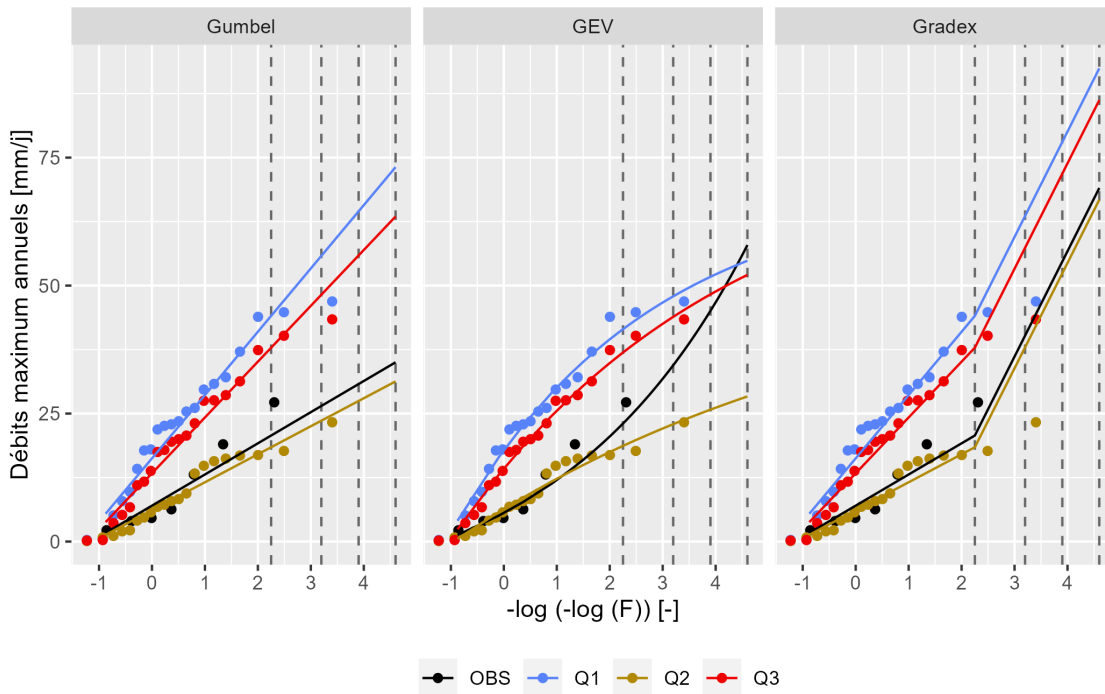
Les lois statistiques Gumbel, GEV et la méthode du Gradex ont été utilisées pour prédéterminer les valeurs des débits des 21 bassins versants étudiés. Ces débits ont été calculés avec les trois méthodes et les quatre séries de débits disponibles (une série observée et trois séries simulées) pour chacun des 21 bassins versants. Il n'est donc pas possible de représenter l'ensemble de ces résultats sur une même figure comme on l'a fait à la figure 5.15 pour les pluies. De ce fait, une figure a été réalisée par bassin versant, et les résultats de seulement deux bassins versants sont présentés dans cette section à la figure 5.19. Les résultats des autres bassins versants sont présentés à l'annexe A.5. Les échantillons formés par les maximum annuels des trois séries de débits simulés sont proches de celui des débits observés pour le bassin versant Q-068 (voir la figure 5.19 (a)). Ainsi, pour une méthode donnée, les valeurs de débits prédéterminés sont plus ou moins proches pour les quatre séries de débits (débits observés et simulés). Par contre, les valeurs de débits varient fortement d'une méthode à l'autre. La loi de Gumbel par exemple donne des débits beaucoup plus faibles (autour de 100 mm/j pour la période de retour 100 ans) que ceux de la loi GEV et la méthode du Gradex (autour de 230 mm/j pour la période de retour 100 ans).

Les résultats sont différents pour le bassin versant Q-058 pour lequel deux des trois séries de débits surestiment fortement la série de débits observés. En plus de l'incertitude associée à la méthode utilisée, il existe donc également une forte incertitude associée aux séries de débits utilisées pour la prédétermination des débits. Dans la section suivante, ces deux types d'incertitudes seront analysées pour quelques périodes de retour sur l'ensemble des bassins versants.

5.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS



(a) Q-068



(b) Q-058

FIGURE 5.19 – Débits maximum annuels (points) et ajustement des lois statistiques Gumbel, GEV et Gradex pour le bassin versant Q-068 en haut et le bassin versant Q-058 en bas. Les débits observés sont en noir et les débits simulés sont en rouge, bleu et marron. Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans.

5.3.4.4 Analyse des incertitudes liées à la prédétermination des débits

La figure 5.20 présente les débits prédéterminés pour trois périodes de retour (10, 50 et 100 ans) calculés avec les trois méthodes et les quatre séries de débits. Les points à droite de la première bissectrice représentent une sous-estimation des débits observés par les débits simulés et inversement, les points à gauche de la première bissectrice représentent une sur-estimation des débits observés. L'étendue verticale de chaque point représente les plages des valeurs des débits obtenus avec les trois séries de débits (les limites des barres verticales représentent les valeurs minimale et maximale). Les résultats montrent que les débits obtenus avec la loi GEV, principalement pour les périodes de retour supérieurs à 50 ans, sont fortement décalés de la première bissectrice pour plus de la moitié des bassins versants, ce qui montre qu'en utilisant cette loi, les débits prédéterminés à partir des débits simulés sont très différents de ceux des débits prédéterminés à partir des débits observés (fortes incertitudes liées à la série de débit utilisée sachant que la loi GEV est utilisée). A l'inverse, les débits obtenus avec la loi Gumbel ou la méthode du Gradex s'alignent sur la première bissectrice, ce qui montre que l'incertitude liée à la série de débit utilisée sachant que la loi de Gumbel ou la méthode du Gradex est utilisée est plus faible.

Bien que les débits obtenus en utilisant la loi de Gumbel ou la méthode du Gradex s'alignent sur la première bissectrice, on peut remarquer que les débits obtenus avec la loi Gumbel sont concentrés sur la partie inférieure de la première bissectrice tandis que ceux obtenus avec la méthode du Gradex sont plus moins repartis sur la première bissectrice. Ce résultat montre que, pour une même série de débit utilisée, les débits obtenus avec la méthode du Gradex sont très élevés par rapport à ceux obtenus avec la loi Gumbel.

Ces analyses illustrent les sources d'incertitude liées à la fois à la méthode utilisée et aux séries de débits utilisées. De plus, en fonction de la méthode utilisée, l'incertitude liée aux séries de débits utilisées n'est pas la même. De ce fait, comme pour la prédétermination des pluies, une gamme des débits prédéterminés avec l'ensemble des méthodes et l'ensemble des données disponibles a été illustrée qualitativement pour chaque bassin versant.

5.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

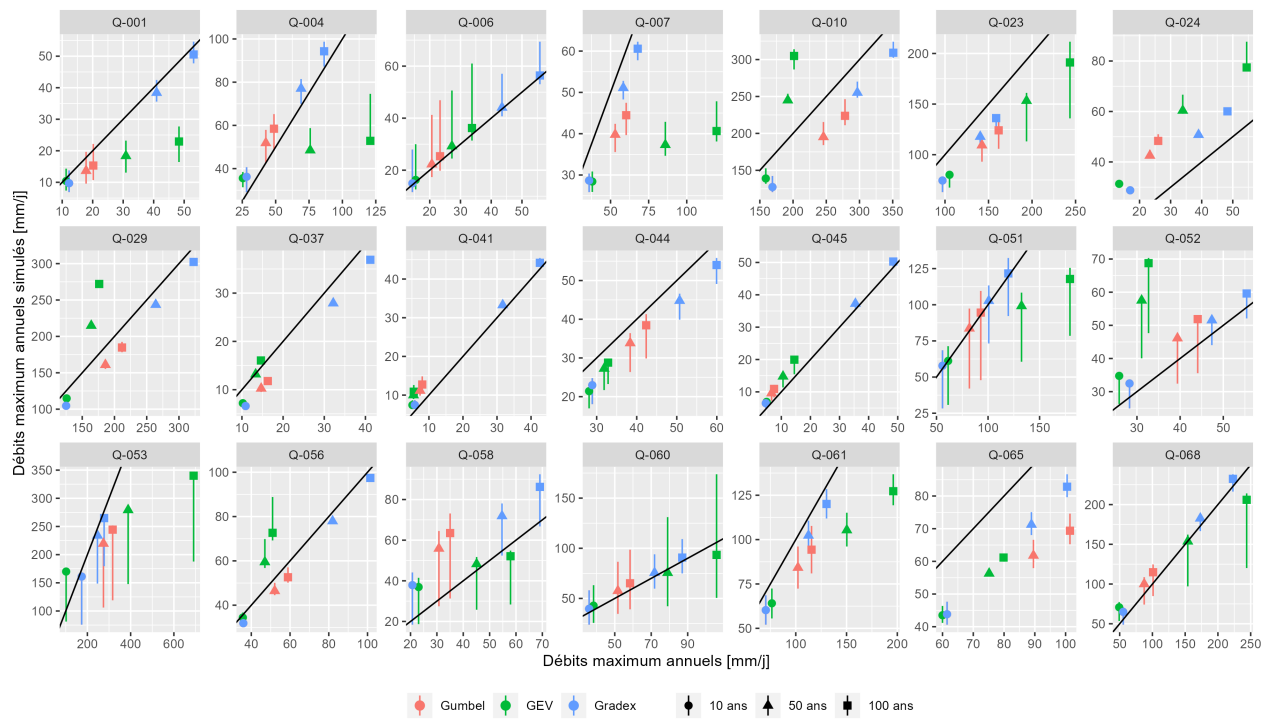


FIGURE 5.20 – Débits prédéterminés à partir des débits simulés (par GR4J) en fonction des débits prédéterminés à partir des débits observés. La première bissectrice est représentée par la ligne noire. Les couleurs des points représentent les lois statistiques utilisées pour la prédétermination. La forme des points représente les périodes de retour étudiées. La longueur verticale de chaque point représente les valeurs minimale et maximale des débits obtenues avec les trois lois statistiques.

La figure 5.21 présente ainsi des plages de valeurs des débits pour quelques périodes de retour. Les limites des barres ont été calculées avec les valeurs minimale et maximale des débits obtenus avec les trois méthodes et les quatre séries de débits. Les résultats montrent que les longueurs des barres sont plus ou moins élevées selon les bassins versants. Ainsi, les barres sont relativement élevées pour le bassin versant Q-053 (bassin versant de Limbé à Pont Christophe) par rapport aux autres bassins versants. Ceci est lié à un pic de débit très élevé dans les données observés (528 mm/j le 21 novembre 1927) et la loi GEV, très sensible aux “outliers”, entraîne la prédétermination de débits très élevés. Ce pic de débit est associé à un pic de pluie (573 mm/j le même jour), ce qui conforte la cohérence de cette valeur importante (mais l’incertitude hydrométrique - pertinence de la courbe de tarage pour ce type de crue sur cette station ? - n’a pas été évaluée ici).

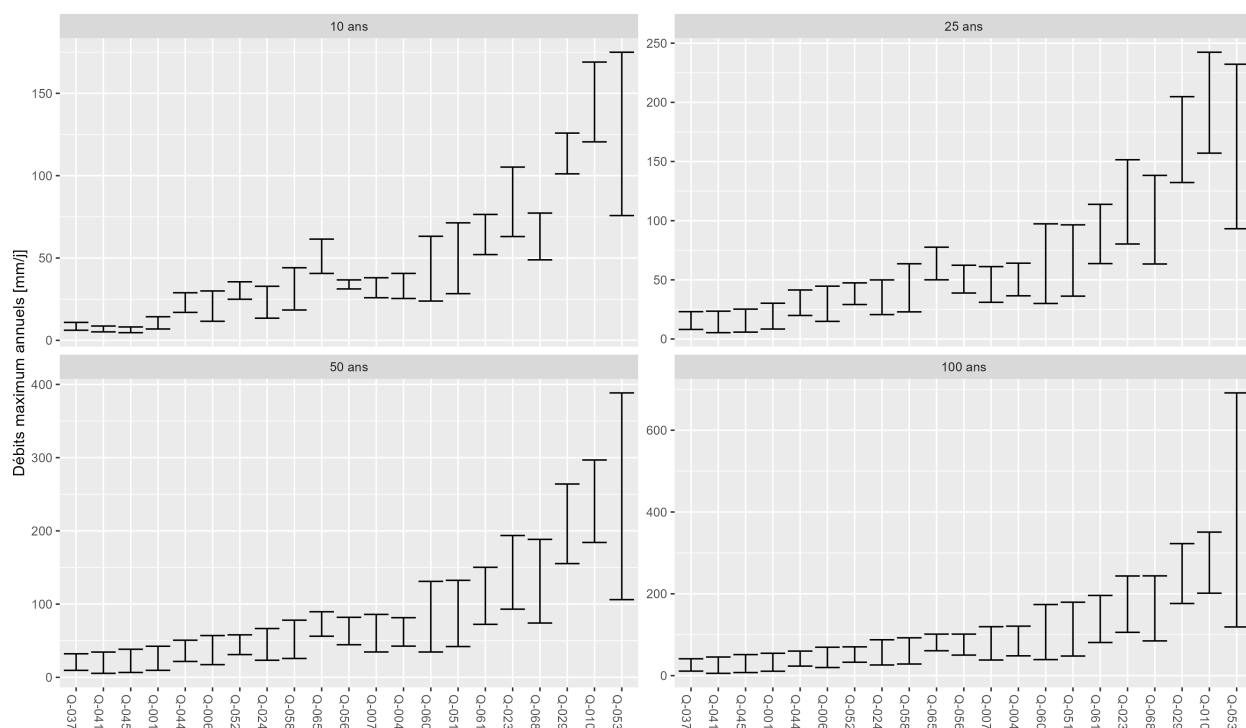


FIGURE 5.21 – Plages de valeurs des débits pour certaines périodes de retour. La limite supérieure des barres représente le maximum des débits obtenus avec les trois méthodes pour chacun des quatre séries de débits (une série observée et trois séries simulées). La limite inférieure des barres représente le minimum des débits obtenus avec les trois méthodes pour chacune des quatre séries de débits (une série observée et trois séries simulées).

La gamme des débits est présentée pour toutes les périodes de retour inférieures à 100 ans à la figure 5.22. Les résultats montrent que les débits prédéterminés avec la méthode du Gradex semblent limiter la borne supérieure de la courbe (changement brusque de pente) pour la plupart des bassins versants. De plus, les incertitudes liées aux débits sont nettement plus élevées que celles liées aux pluies.

5.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

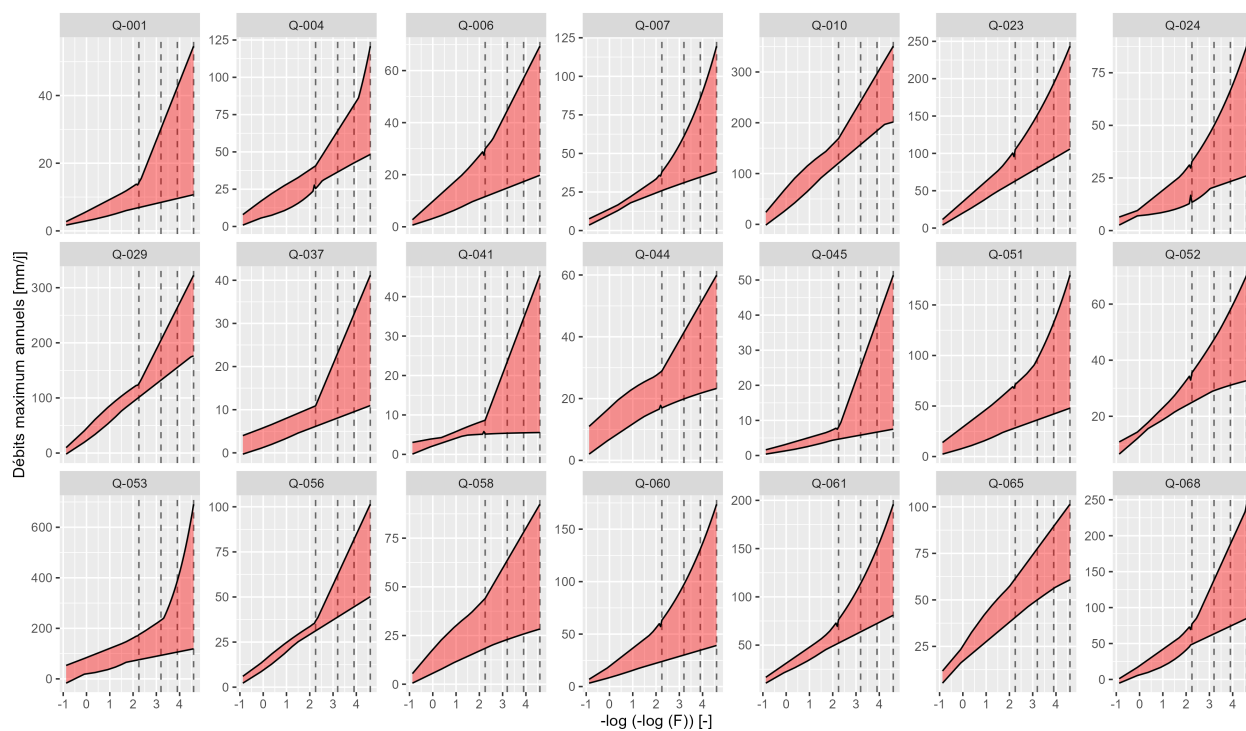


FIGURE 5.22 – Plages de valeurs des débits prédéterminés pour les 21 bassins versants étudiés. La limite supérieure des barres représente le maximum des débits obtenus avec les trois méthodes pour chacun des quatre séries de débits (une série observée et trois séries simulées). La limite inférieure des barres représente le minimum des débits obtenus avec les trois méthodes pour chacun des quatre séries de débits (une série observée et trois séries simulées). Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans.

La figure 5.23 présente les cartes des débits décennaux et centennaux en haut et les écarts-types en bas. Les écarts-types qui représentent la dispersion par rapport à la moyenne, ont été calculés avec les valeurs de débits obtenues avec les débits observés et simulés et les lois Gumbel, GEV et la méthode du Gradex. Les résultats montrent que le débit décennal est entre 60 et 140 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type entre 10 et 20 mm/j), et entre 10 et 60 mm/j ailleurs (avec un écart-type inférieur à 10 mm/j). Le débit centennal est entre 200 et 300 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type entre 40 et 80 mm/j), et entre 30 et 100 mm/j ailleurs (avec un écart-type autour de 30 mm/j). Le bassin versant Q-053 discuté précédemment présentent des écarts types très élevés.

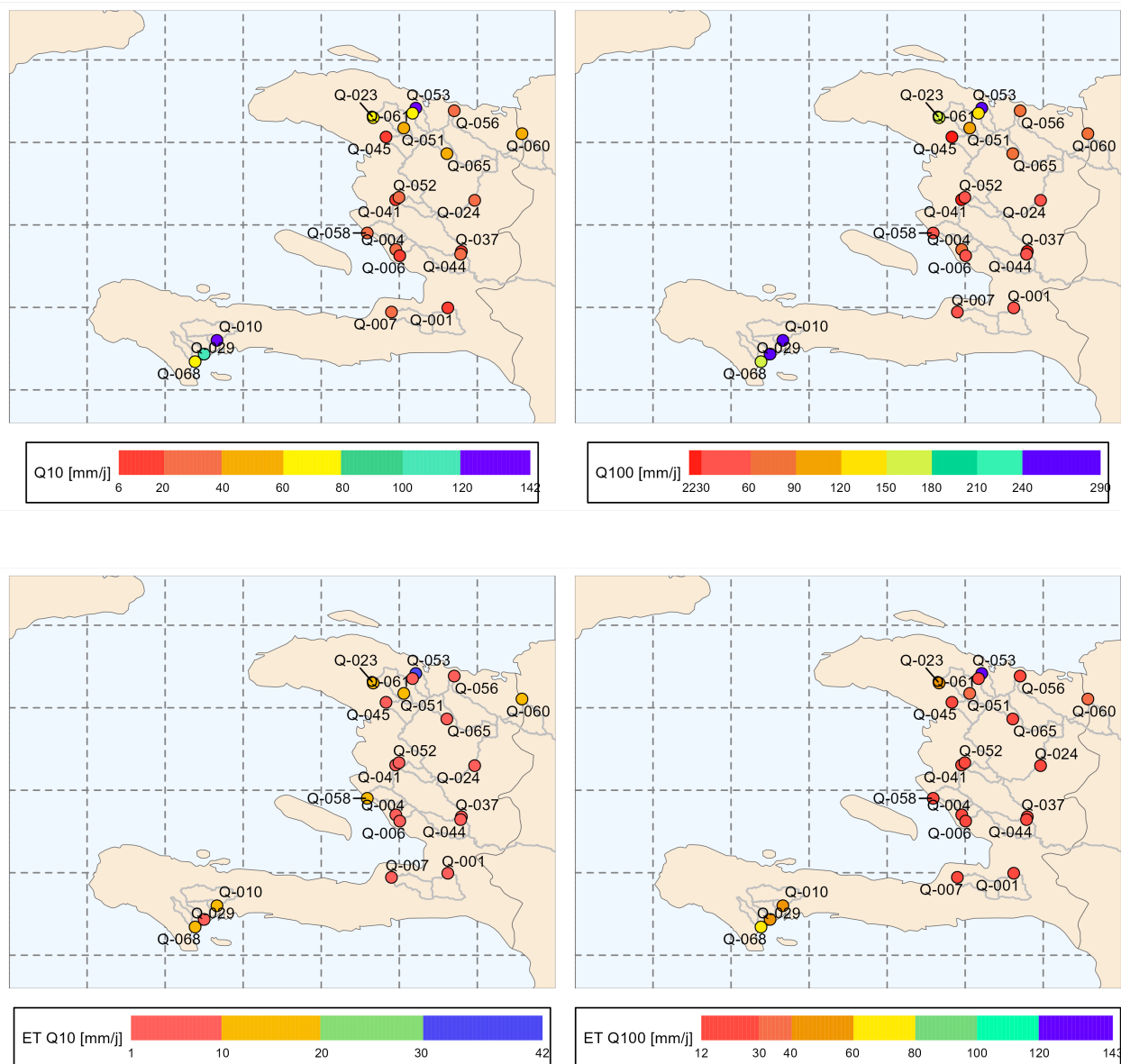


FIGURE 5.23 – En haut : cartes des débits décennaux et centennaux pour les 21 bassins versants étudiés sur la période historique (1920-1940). En bas : cartes des écarts-types des débits décennaux et centennaux calculés avec les valeurs des débits observés et simulés et les méthodes Gumbel, GEV et Gradex.

5.4 Conclusion du chapitre

La première partie de ce chapitre a permis de réaliser une analyse spatio-temporelle des pluies et des débits en Haïti sur la période 1920-1940 à partir de la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a). Dans un premier temps, les régimes et les variabilités interannuelles des pluies et des débits ont été étudiés. Puis, les épisodes de fortes pluies et les débits maximum générés ont été étudiés à leur tour. Les résultats ont montré que les quatre saisons de pluies caribéennes WDS (décembre à avril), ERS (mai et juin), MSD (juillet et août) et LRS (septembre à novembre) ont été observées dans les régimes des pluies des 21 bassins versants étudiés. La plupart des bassins versants ont un régime de pluie et de débit bimodal, avec des pics de pluie et de débits pendant l'ERS et la LRS. Cependant, certains bassins versants, situés au nord de Port-au-Prince, présentent un régime de pluie unimodal, avec une longue période de pluie de mai à novembre mais moins intense par rapport aux autres bassins versants. Ces résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus par Moron *et al.* (2015). Les résultats ont aussi permis d'identifier une période sèche entre les années 1920-1925. Une période humide a été observée à partir de 1925 jusqu'en 1930 et parfois jusqu'en 1935-1940 pour certains bassins versants. Ces résultats sont cohérents avec les alternances de périodes sèche et humide observées à l'échelle caribéenne (Hastenrath & Polzin, 2013).

En moyenne, entre 7 à 12 épisodes de fortes pluies (épisodes de pluies dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm) par an ont été identifiés de manière automatique sur chacun des 21 bassins versants étudiés. Ces épisodes de fortes pluies sont plus fréquents dans le sud-ouest d'Haïti et ont été observés généralement pendant l'ERS (mai et juin) et la LRS (septembre à novembre). Certains épisodes de fortes pluies, généralement ceux dont les cumuls sont situés entre 650 et 800 mm, ont généré des débits maximum pouvant atteindre 150 mm/j et même plus.

La deuxième partie de ce chapitre visait à réaliser une analyse fréquentielle des pluies et des débits à partir de trois méthodes : Gumbel, GEV et Gradex. Cette analyse a permis d'obtenir des ordres de grandeur de pluies et débits pour plusieurs périodes de retour. Ainsi, la pluie centennale est autour de 500 mm/j dans le sud-ouest et entre 100 et 250 mm/j ailleurs. Le débit centennial est entre 200 et 300 mm/j dans le sud-ouest et entre 30 et 100 mm/j ailleurs. Les résultats obtenus ont montré que les pluies et débits prédéterminés sont différents en fonction de la méthode utilisée, et même très différents pour certains bassins versants, ce qui met en évidence des incertitudes fortes liées au choix de la méthode utilisée. Dans cette étude, nous nous sommes limités à présenter les incertitudes de manière qualitative, sous forme de plage de valeurs possibles. Les limites supérieures (inférieures) des plages de valeurs représentent les valeurs maximales (minimales) des pluies et des débits obtenus avec les différentes méthodes.

En fait, il existe plusieurs types d'incertitudes dans l'analyse fréquentielle des pluies et des débits. Par exemple, il existe :

- a. des incertitudes liées à la qualité et la quantité de données disponibles,
- b. des incertitudes liées à la période de disponibilité des données,
- c. des incertitudes liées aux types de données utilisées (observés, simulés, réanalyses, etc),
- d. des incertitudes liées à l'estimation des paramètres des lois statistiques utilisés,
- e. des incertitudes liées à la méthode utilisée.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer ces incertitudes, par exemple la méthode bootstrap (Gilleland, 2020a, b) qui consiste à enlever successivement plusieurs années de données et calculer ces quantiles sans ces données. Puis, répéter ce processus un certain nombre de fois afin de déterminer un intervalle de confiance. Cependant, les estimations des incertitudes n'ont pas été abordées dans cette étude. Néanmoins, cette thématique de recherche sur les estimations des incertitudes liées à l'analyse fréquentielle des pluies et des débits semble être une piste intéressante pour les prochaines études en Haïti.

Deuxième partie

Analyse de l'hydrologie haïtienne entre 1979 et 2017

Chapitre 6

Performances des produits de pluies maillées dans les Grandes et les Petites Antilles

6.1 Objectifs de ce chapitre

Au contraire de la période 1920-1940, aucune base de données hydro-climatique de référence n'existe (observations in situ) en Haïti sur cette période récente (1979-2017). De ce fait, des données alternatives, telles que les bases de données de pluies maillées issues de différentes techniques de télédétection (Kucera *et al.*, 2013; Rahman & Di, 2017) ont été utilisées pour l'analyse de l'hydrologie des bassins versants sur cette période récente. Certaines données de pluies maillées ont l'avantage d'avoir une bonne résolution spatiale, ce qui permet de mieux étudier la forte variabilité spatiale des pluies en Haïti. De plus, ces données sont disponibles de manière continue (sans lacunes) sur au moins 30 ans, et sont donc largement utilisées dans le monde, principalement dans les régions peu instrumentées (Gosset *et al.*, 2023, 2013). Par contre, la performance des produits de pluies maillées varie en fonction de la zone d'étude et, à date, une seule évaluation de la performance de ces produits de pluies maillées a été réalisée dans la zone d'étude par Centella-Artola *et al.* (2020) mais au pas de temps mensuel, ce qui représente une forte limite lorsque l'on s'intéresse aux crues. Ainsi, l'objectif de ce chapitre consiste à évaluer la performance de cinq produits de pluies maillées (MSWEP, CHIRPS, ERA-5, PERSIANN-CDR et GPM-IMERG) dans les Grandes et les Petites Antilles. Le choix de ces cinq produits de pluies a été fait en fonction de leurs performances à l'échelle mensuelle dans les Antilles (Centella-Artola *et al.*, 2020) et de leurs disponibilités au pas de temps journalier.

6.2 Performances de cinq produits de pluies maillées dans les Grandes et les Petites Antilles

La région des Grandes et des Petites Antilles est très vulnérable aux aléas hydro-climatiques, et cette vulnérabilité ne cesse de croître dans ce contexte de changement climatique (Stennett-Brown *et al.*, 2019; Burgess *et al.*, 2018; Change, 2014). Compte tenu de la vulnérabilité de ces territoires face à ces aléas, des bases de données pluviométriques sont nécessaires à des échelles spatio-temporelles les plus fines possible afin de caractériser ces aléas et faire ressortir des indices pertinents qui serviront à une meilleure adaptation face aux risques hydro-climatiques. Malheureusement, cette région est peu instrumentée, et la majorité des études a été réalisée en utilisant des données alternatives, à base de télédétection (Angeles *et al.*, 2010; Jones *et al.*, 2016; Jury, 2016) et le plus souvent sans évaluer leurs performances et leurs capacités à bien estimer la pluviométrie dans les zones d'études respectives.

Ce travail vise à mettre en évidence les qualités et les lacunes de 5 produits de pluies maillées (MSWEP, CHIRPS, PERSIANN-CDR, ERA-5 et GPM-IMERG) dans les Grandes et les Petites Antilles afin de guider les utilisateurs dans le choix du produit de pluies à utiliser en fonction des objectifs recherchés. Ces 5 produits de pluies ont été choisis en fonction de leurs performances dans d'autres régions du monde et de leurs disponibilités au pas de temps journalier. Huit métriques statistiques ont été utilisées pour comparer les produits de pluies maillées aux observations in situ afin d'évaluer leur capacité à estimer la pluviométrie dans les Antilles : cinq métriques statistiques (RMSE (erreur quadratique moyenne), KGE (Gupta *et al.*, 2009) et ses trois composantes) ont été utilisées pour évaluer la quantité de pluies estimée par ces cinq produits de pluies maillées et les trois autres métriques statistiques (POD (probabilité de détection), FAR (indice de fausse alerte) et CSI (indice critique de réussite)) ont été utilisées pour évaluer la capacité de ces cinq produits à identifier les jours humides et les jours secs. Le régime de pluie a été également représenté afin d'évaluer la capacité de ces cinq produits de pluies à représenter la saisonnalité des pluies. Enfin, certains quantiles de fortes pluies ont été calculés pour évaluer la capacité de ces cinq produits de pluies à estimer les précipitations rares et extrêmes. L'ensemble de cette étude a été publiée sous forme d'un article scientifique (Bathelemy *et al.*, 2022) dans la revue *Journal of Hydrology : Regional Studies* et est présenté dans les sections suivantes.

6.3 Introduction

The Greater and Lesser Antilles region experienced 264 tropical cyclones between 1960 and 2013, accounting for 95 % of the total damage from all natural disasters in the region (Burgess *et al.*, 2018). These tropical cyclones generate heavy rainfall events (Khouakhi *et al.*, 2017) that cause large floods, whose intensities and frequency will tend to increase due to climate change (Peterson *et al.*, 2002). Given the vulnerability of Greater and Lesser Antilles territories to hydro-meteorological hazards, rainfall databases are needed on a daily or sub-daily timescale to calculate relevant indices (e.g., the annual number of wet days above a certain threshold, 100-year rainfall maxima) to statistically characterize heavy rainfall events and to discuss their frequency and potential trends over time. Although rain gauges provide accurate local measurements of rainfall amount, they are not numerous enough in this region to reflect the high spatial and temporal variability of rainfall (Kidd *et al.*, 2017; Villarini *et al.*, 2008). This data scarcity is even more critical when studying heavy rainfall events, which requires information on a fine spatiotemporal scale. In this context, remote sensing offers an opportunity to better study the spatiotemporal variability of precipitation (Griffith *et al.*, 1978). Rainfall data obtained from remote sensing have the advantage of a wide spatiotemporal area coverage and have shown high potential for use in many applications (Dinku *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2015), such as rainfall and flow forecasting, mapping heavy rainfall statistics, flood hazard mapping and many other hydrological applications (Mazzoleni *et al.*, 2019; Wannasin *et al.*, 2021).

Currently, there are more than 10 precipitation products obtained by remote sensing available in the world, covering different periods and different spatiotemporal scales (Centella-Artola *et al.*, 2020). These remotely sensed precipitation products were created mainly from (i) satellite data (infrared observations, passive microwave observations, soil moisture observations, etc.), (ii) combinations of different data sources (satellite rainfall estimates [SRE], reanalysis rainfall products, observation data, etc.) or (iii) using atmospheric physics models coupled with reference data to create reanalysis products such as ERA-5 reanalysis. Several papers have evaluated the performance of such rainfall gridded datasets (RGD) at different spatiotemporal scales and in different climate regions [Baez-Villanueva *et al.* (2018); Prakash (2019); Stampoulis & Anagnostou (2012); Tan & Santo (2018); xu2017]. Results indicate that the performance of the RGD is highly dependent on topography, geography and climate. Tang *et al.* (2019) evaluated the performance of four RGD in six climate regions in the Mekong Basin of Southeast Asia. The rainfall products were divided into seven classes, with the purpose of evaluating the ability of RGD products to estimate light and heavy rainfall in different climatic zones. The results showed that all four products performed differently in the six climate zones, although the RGD tended to perform better in wet climates than in dry climates. Alijanian *et al.* (2017) evaluated the performance of five RGD in eight climatic zones in Iran through correlation coefficient, root mean square error and relative error during the period 2003–2012. Their results showed that the performance of RGD varies with climate zones, with better performance in very hot and humid climates. The same conclusions were drawn for heavy rainfall (rainfall above the 90th percentile) for two RGD in China by Fang

et al. (2019). In addition to the influence of climate on the performance of RGD, Fang *et al.* (2019) showed that topography also has a significant influence on heavy rainfall estimation, with correlation coefficients that decrease with altitude. These few examples show the advantages and limitations of the RGD in the regions studied, and the need to evaluate their performance for the Lesser and Greater Antilles because the climate dynamics of these islands have a range of concurrent interactions between mid-latitudes and tropical features at all spatial scales (Martinez *et al.*, 2019).

In the Caribbean region, several studies have used RGD as baseline data to study spatial and temporal rainfall variability (Angeles *et al.*, 2010; Jones *et al.*, 2016; Jury, 2016), flood mapping (Bozza *et al.*, 2016) and the dynamic mechanisms that determine the spatial and temporal patterns of the seasonal cycle (Martinez *et al.*, 2019; Moron *et al.*, 2016), but very few studies compared such databases with rainfall observations. In the Caribbean region, which including the Greater and Lesser Antilles. However, very few studies have evaluated their performance specifically in the Greater and Lesser Antilles. A first comparison between rainfall observations, reanalysis, satellite and coupled model datasets was performed by Jury (2009b). The first part of the study aimed to evaluate in a qualitative way the ability of RGD to capture several climatic features over the Caribbean region, and the second part of the study evaluated the ability of gridded rainfall to capture the annual rainfall cycle. More recently, a study evaluating the performance of 16 RGD on a monthly timescale was done by Centella-Artola *et al.* (2020) in the Caribbean. The results show that MSWEP is one of the best performing RGD, and ERA-5 performed best among the reanalysis products. Both the evaluations by Jury (2009b) and Centella-Artola *et al.* (2020) were done on a monthly timescale. Nevertheless, using long (typically several decades) temporal series at the daily or sub-daily timestep is required for hydrological studies dedicated to heavy rainfall and flood statistics. The performance of these rainfall gridded datasets products varies from one timescale to another, and they tend to perform better on a monthly than a daily timescale (Sultana & Nasrollahi, 2018; Tan *et al.*, 2015). In this context, this work aims to evaluate the general performance of five rainfall gridded datasets (RGD) available at the daily time step over the period 1980–2019 (MSWEP, CHIRPS, ERA-5, PERSIANN-CDR and GPM IMERG). These four RGD are chosen according to (i) their performance in the Greater and Lesser Antilles on a monthly timescale (Centella-Artola *et al.*, 2020) and (ii) their availability on a daily timescale over several decades. To our knowledge, this is the first study on the evaluation of RGD in the Greater and Lesser Antilles on a daily timescale, aiming to highlight the qualities and shortcomings of RGD over these poorly instrumented islands. This paper is structured as follows : Section 2 presents the study area, 3 Rainfall data used, 4 Methodology present the data and methods used, 5 Results, 6 Discussion present the results and discussion, and Section 7 presents conclusion to the paper.

6.4 Study area

The study area, shown in figure 6.1, is the region between North America and South America and includes the islands that are surrounded by the Gulf of Mexico in the North-West, the Caribbean Sea in the South and the Atlantic Ocean in the East. These islands are often represented in two major groups : The Greater Antilles, grouping Cuba, Hispaniola, Jamaica and Puerto Rico and the Lesser Antilles, which is an island group located to the East and Southeast of the Caribbean Sea and composed of the islands of the Southern part of the Caribbean arc from Puerto Rico to South America.

The Greater Antilles has a bimodal annual rainfall cycle, with a first rainy season in May and a second rainy season between September and November. This bimodal annual rainfall cycle is influenced by the NASH (North Atlantic Subtropical High; Davis *et al.* (1997)) and the CLLJ (Caribbean Low-Level Jet; Cook & Vizy (2010)). The Lesser Antilles has a unimodal annual rainfall cycle strongly influenced by the ITCZ (Intertropical Convergence Zone; Hastenrath (2002)), with peak rainfall in November.

The heavy rainfall in the Greater and Lesser Antilles, observed between September and November, is strongly influenced by tropical cyclones of the North Atlantic. 85 % of intense tropical cyclones originate in East African Waves (Agudelo *et al.*, 2011; Thorncroft & Hodges, 2001) coupled with the Atlantic Warm Pool (area with sea temperatures greater than 28.5 °C; Wang & Enfield (2003)) and the Intertropical Convergence Zone.

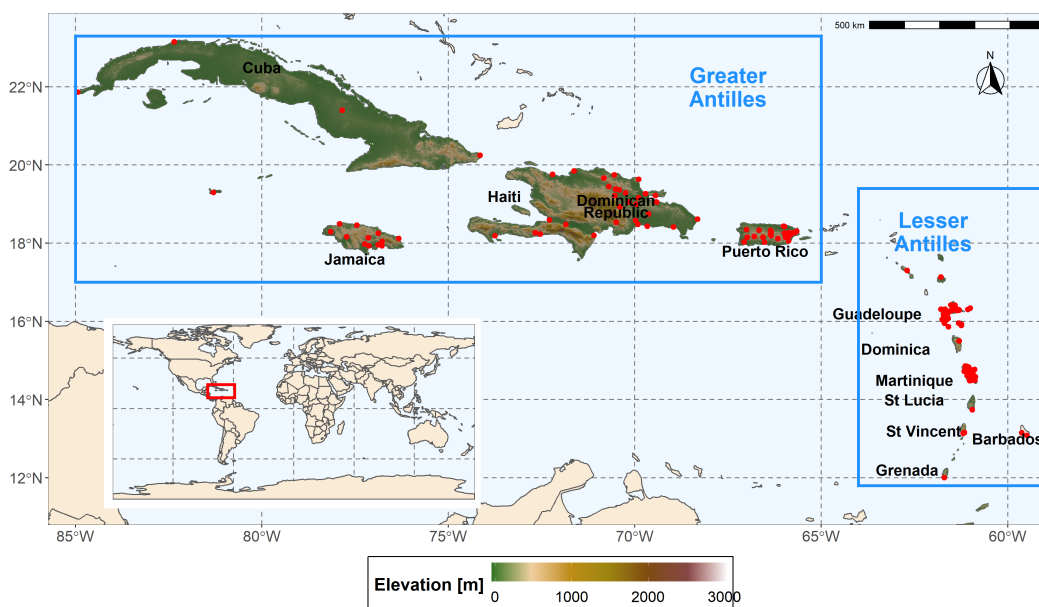


FIGURE 6.1 – Location of the rain gauges, the two studied regions (Greater and Lesser Antilles) and of the principal countries and islands studied. Elevation of the SRTM database (Reuter *et al.*, 2007) is plotted in the background.

Rainfall in the Greater and Lesser Antilles depends on dominant easterlies, topography, and land-sea interactions. The spatial pattern of rainfall in these islands is very inhomogeneous due to their complex topography (Cantet, 2017; Moron *et al.*, 2015). Rainfall is relatively important (2 000–4 000 mm/year) in the higher elevations and windward parts (Smith *et al.*, 2012). In contrast, annual rainfall can be as low as 500 mm/year in the leeward areas (Daly *et al.*, 2003).

6.5 Rainfall data used

The rainfall data used in this study are classified into two categories : the rain gauge data that will be used as reference and the RGD (Rainfall Gridded Datasets). A short description of both types of rainfall dataset is provided below.

6.5.1 Rain gauge data

6.5.1.1 Presentation of the reference rain gauges

The set of 146 rainfall series that we will use in this study comes from several institutions : Météo-France, the Hydrometeorological Unit of Haiti (UHM), the Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology (CIMH), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the Meteorological Service of Jamaica (MetService), the Meteorological Institute of the Republic of Cuba (InsMet) and the National Meteorological Office of the Dominican Republic (ONAMET). Figure 6.2 presents the gaps in the data availability for each dataset.

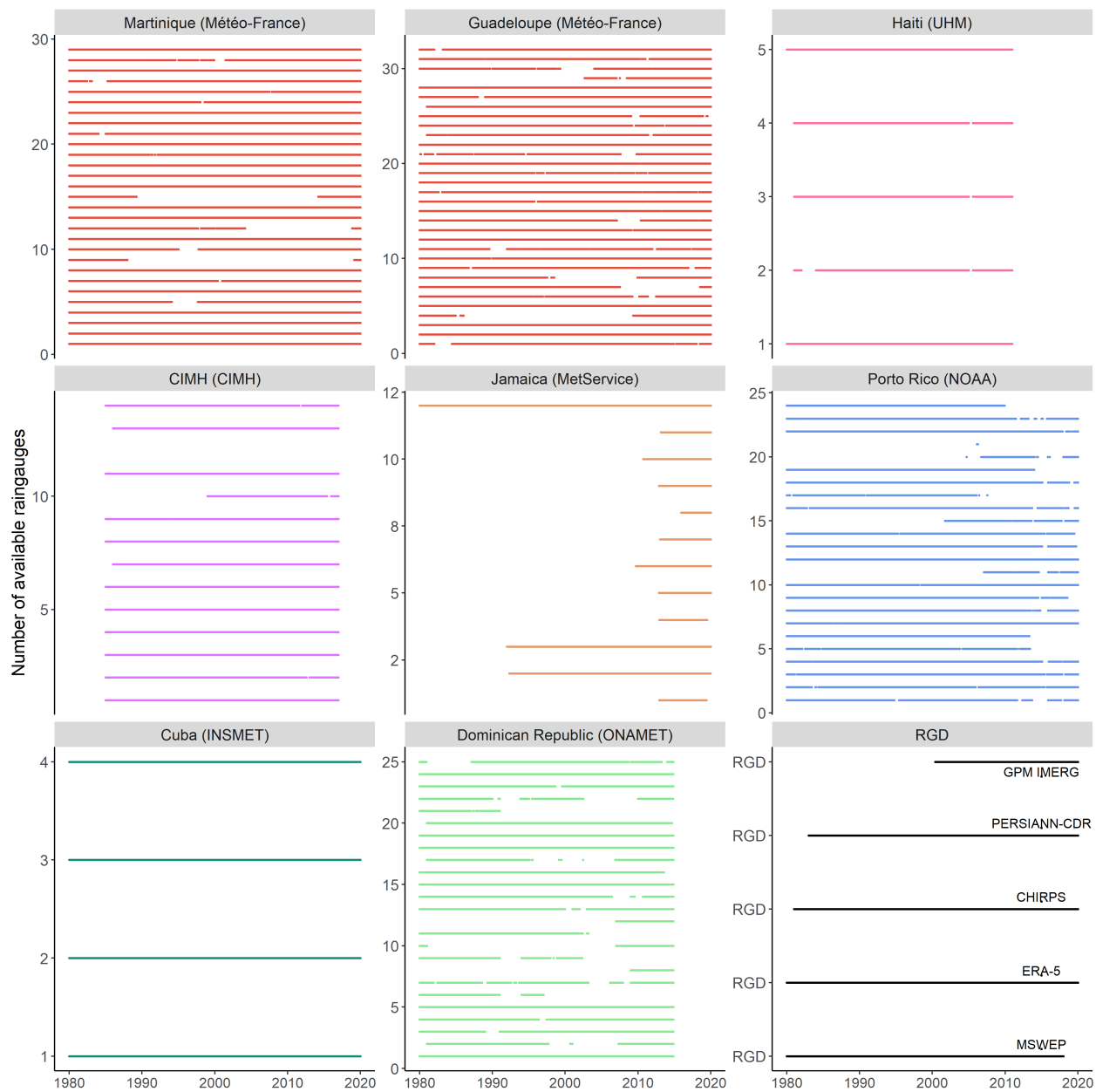


FIGURE 6.2 – Periods of data availability for each of the rain gauge databases used.

6.5.1.2 Quality control of the reference rain gauges

Rain gauge data are used as reference data to evaluate the performance of RGD in the Greater and Lesser Antilles. These reference data can have considerable measurement errors (Sevruk *et al.*, 2009 ; Viney & Bates, 2004), therefore, quality control is an essential step before evaluating the RGD. To identify and discard periods or rain gauges with significant measurement errors, we used a procedure with the following steps (this method is inspired by that of Beck *et al.* (2019)) :

- a. Remove the rainy days with more than 1000 mm/d,
- b. Remove months with more than 20 days of missing data,
- c. Remove years with more than 200 days of missing data,
- d. Remove stations with less than 5 years of data,
- e. Test the uniformity of the data series from the annual sum of the stations by the method of cumulative residuals as described by Bois (1987). This method consists of plotting the cumulative residuals of the linear regression between a reference station and a station to be tested. The 90 % confidence intervals for the cumulative residuals of each year are plotted, to form a confidence ellipse inside which the curve of the cumulative residuals should remain. The reference station is a synthetic station formed by the median of the annual accumulations of all stations in the same country.

19 of 146 rain gauges were removed after quality control testing on reference data. Among the 127 rain gauges remaining, 27 are in Guadeloupe, 25 in Martinique, 21 in Dominican Republic, 5 in Haiti, 4 in Cuba, 10 in Jamaica, 22 in Puerto Rico and 13 in small islands where CIMH provided rain gauge data.

6.5.1.3 Independence of the rain gauges from the stations used for RGD development

Of the five RGD used in our analysis, three RGD (MSWEP, CHIRPS and PERSIANN-CDR) have been used rainfall products derived from rain gauges such as GPCC (Schneider *et al.*, 2014), GSOD [<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00516>], GHCN (Menne *et al.*, 2012) and GPCP (Adler *et al.*, 2003), and two RGD (CHIRPS and MSWEP) have been used rain gauges directly. The rain gauges used by CHIRPS are from Mexico, Central America, South America and sub-Saharan Africa (Funk *et al.*, 2015b) and not from the Greater and the Lesser Antilles. However, Beck *et al.* (2019) have been used daily rainfall series from the Greater and the Lesser Antilles to calibrate MSWEP rainfall dataset. We excluded the 24 rain gauges (figure A.3 in appendix) identified as positioned within a 1-km radius from rain gauges mentioned as used within the MSWEP V2.8 dataset to ensure the independence of the rain gauges from the stations used for RGD development. Among the 103 rain gauges remaining, 27 are in Guadeloupe, 22 in Martinique, 19 in Dominican Republic, 5 in Haiti, 2 in Cuba, 10 in Jamaica, 6 in Puerto Rico and 12 in small islands where CIMH provided rain gauge data.

6.5.2 RGD (Rainfall Gridded Datasets)

6.5.2.1 Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks—Climate Data Record (PERSIANN-CDR)

PERSIANN-CDR is a multi-satellite product that provides daily precipitation estimates with a spatial resolution of 0.25° from 1983 onwards (Ashouri *et al.*, 2015). The PERSIANN artificial neural model is pre-trained with NCEP (National Centers for Environmental Prediction) stage IV hourly precipitation radar data. Then, PERSIANN-CDR is generated by the PERSIANN algorithm using GridSat-B1 infrared data (Knapp, 2008). The final product is adjusted with the monthly GPCP (Global Precipitation Climatology Project) product to ensure that both datasets are consistent on a monthly scale.

6.5.2.2 Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data (CHIRPS)

CHIRPS precipitation estimates (version 2) are available from 1981 onwards with a spatial and temporal resolution of $0.05^\circ/24$ h (Funk *et al.*, 2015b). This database uses monthly precipitation climatology CHPClim (Climate Hazards Group Precipitation Climatology), quasi-global geostationary thermal infrared satellite observations, Tropical Rainfall Measuring Mission’s (TRMM) 3B42 product, atmospheric model rainfall fields from NOAA CFS (Climate Forecast System), and precipitation observations from different sources, including national or regional meteorological services. The CHIRPS production requires two steps. First, pentad (five-day) rainfall estimates are created from CCD (Cold Cloud Duration) which are obtained from regression models, and calibrated by using TRMM 3B42 pentad precipitation; these estimates are expressed as a percentage of normal precipitation by dividing the estimated values for regression models by their long-term averages (this outcome is names CHIRP). Then, in-situ observation from stations are blended with CHIRP data in order to produce CHIRPS.

6.5.2.3 Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)

The second version of MSWEP, as described by Beck *et al.* (2019) is a global gridded dataset for the period 1979–2017 with a spatiotemporal resolution of $0.1^\circ/3$ h. This dataset is derived by merging rainfall estimates based on rain gauges coming from different databases : [WorldClim (Fick & Hijmans, 2017), GHCN-D (Menne *et al.*, 2012), GSOD [<https://data.noaa.gov>], and national databases from different country], different SRE : [CMORPH (Joyce *et al.*, 2004), GridSat (Knapp *et al.*, 2011), GSMaP (Ushio *et al.*, 2009), and TMPA 3B42RT (Huffman *et al.*, 2007)] and reanalysis : [ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) and JRA-55 (Kobayashi *et al.*, 2015)].

To build MSWEP, Beck *et al.* (2019) was evaluated the performance of the gridded datasets using the correlation coefficient of the gridded data with the 3-day mean rainfall data. Next, the data were merged via weighted averaging using the interpolated weight maps deduced from the correlation coefficients. The biases of the merged data are corrected by a multiplicative approach used by Vila *et al.* (2009) to preserve the sub-daily rainfall distribution.

6.5.2.4 ERA-5

We use the fifth generation of the atmospheric global climate reanalysis ERA-5 available from 1980 onwards with a spatiotemporal resolution of $0.25^\circ/1$ h (Hersbach *et al.*, 2020). ERA-5 is produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). This new reanalysis replaces the ERA-Interim reanalysis that started in 2006. ERA-5 benefits from decades of developments in the dynamics of data assimilation models and combines them with observations of wind, pressure, temperature, precipitation and humidity from several satellites and from observations near the earth’s surface and over the oceans, from upper air soundings and from atmospheric measurements from aircraft instruments. This is based on the hybrid 4D-Var data assimilation method using the Cy41r2 cycle of the Integrated Forecast System (IFS) Cy41r2 (Hersbach and De Rosnay, 2018).

6.5.2.5 NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)

The GPM IMERG was launched in February 2014 as the successor to TRMM, to provide the next generation of global precipitation products. It consists of one Core Observatory and approximately 10 constellation satellites. The Core Observatory carries a Ku/Ka-band dual-frequency precipitation radar and a multi-channel GPM IMERG microwave imager, extending the measurement range of TRMM instruments. GPM IMERG provides three levels of precipitation-related products. The level-3 products are produced with the IMERG algorithm, which intercalibrates and merges precipitation estimates from all constellation microwave sensors, microwave-calibrated infrared satellite estimates, and monthly gauge precipitation data (Hou *et al.*, 2014). The GPM IMERG products, available from 2000 onwards, offer a relatively fine spatial resolution of

$0.1^\circ \times 0.1^\circ$ and high temporal resolution of 30 min. The GPM IMERG Day 1 Final Run V6 data is used in this study. The Final Run product introduces GPCC rainfall dataset (Schneider *et al.*, 2014) for bias correction, generally considered to be more accurate results than the near real-time products (Early and Late Run), and is thus widely used in hydrology and climate researches (Huffman *et al.*, 2015).

Table A.4 (in appendix) briefly lists the main characteristics of the selected gridded rainfall data – PERSIANN-CDR, CHIRPS, MSWEP, ERA-5 and GPM IMERG.

6.6 Methodology

In this section, we describe the methodology designed to evaluate the performance of RGD in the Greater and Lesser Antilles. Four of the used RGD are available from 1980 (PERSIANN-CDR, CHIRPS, MSWEP and ERA-5), and GPM IMERG is available from 2000. GPM IMERG is a RGD widely used in hydrological applications (Li *et al.*, 2021; Pradhan *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022) and has thus being used in this study despite its shorter temporal extension. Thus, we evaluated the performance of four RGD (MSWEP, ERA-5, CHIRPS and PERSIANN-CDR) over the 1980–2019 period and all five RGD over the 2000–2019 period. First, the method used to compare RGD grid points and rain gauges temporal series is presented (subsection 6.6.1). Then, the different performance measures calculated are listed (subsection 6.6.2).

6.6.1 Comparison between RGD grid points and rain gauges temporal series

6.6.1.1 Point-to-pixel analysis

A point-to-pixel analysis was applied to compare the time series of the reference rain gauge stations (i.e. the points) with the corresponding grid cell values (i.e. the pixels). This approach has been chosen over the pixel-to-pixel methodology (Saemian *et al.*, 2021) given the sparse rain gauges density over the studied region. Thus, the application of a pixel-to-pixel methodology requires to have a gridded reference dataset or to spatially interpolate reference rain gauges data.

In the Lesser Antilles, particularly in the Martinique and Guadeloupe French Islands (cf. figure A.4 in appendix), more than one rain gauge is counted on the same RGD pixel. For each RGD pixel containing more than one rain gauges, an area-weighted average of the considered rain gauge series has been performed using the Thiessen polygons (e.g. Liu *et al.* (2015); Tang *et al.* (2020)).

6.6.1.2 RGD upscaling

The four RGD considered have different spatial resolutions. The point-to-pixel analysis has been performed (i) to the original RGD resolution, and also (ii) at a similar resolution of 0.25° , which is the resolution of the ERA-5 and PERSIANN-CDR coarser RGD considered. Thus, an upscaling of the CHIRPS, and MSWEP datasets has been performed to a new spatial resolution of 0.25° by using bilinear interpolation (Baez-Villanueva *et al.*, 2018).

6.6.1.3 Use of two different rain gauges sets

The MSWEP RGD has been produced considering different ground datasets, including several rain gauges (see subsection 6.5.1.3). Thus, this bias-corrected dataset is expected to better perform than the RGD that do not use rain gauge stations (e.g. Baez-Villanueva *et al.* (2018)). To ensure the independence of the rain gauge stations used as reference in our study and those used during the RGD construction, we calculated the performances of the RGD on two different rain gauges sets. First, 103 rain gauges are considered excluding the 24 rain gauges identified as positioned within a 1-km radius from rain gauges mentioned as used within the MSWEP V2.8 datasets. Then, all the 127 rain gauges are considered. The excluded rain gauges are identified in the figure A.3 in appendix.

6.6.2 Evaluation of the RGD performances

The RGD were evaluated along four characteristics :

- a. General performance.
- b. Reproduction of wet and dry days.
- c. Reproduction of rainfall seasonality.
- d. Estimation of heavy rainfall.

6.6.2.1 General performances of the RGD

Performances at the daily time steps

The general performance of the RGD are evaluated at the daily time-step by five statistical metrics :

- a. the root mean square error (RMSE [mm/d]),
- b. the correlation coefficient (R [-]),
- c. the α coefficient (α [-]) : ratio of the standard deviation of the RGD to the standard deviation of the observations,
- d. the β coefficient (β [-]), ratio of the mean of the RGD to the observations,
- e. the Kling and Gupta Efficiency score (KGE [-], Gupta *et al.* (2009)).

The KGE score is widely used in hydrology in order to compare observations with model simulations (e.g. Arciniega-Esparza *et al.* (2022); Mathevet *et al.* (2020)), and is also used in the context of RGD comparison with rain gauges series (e.g. Baez-Villanueva *et al.* (2018); Centella-Artola *et al.* (2020); Saemian *et al.* (2021)). The KGE is a combination of the R, β and α coefficients, and thus evaluates the general performance of the RGD in reproducing rainfall in the Greater and the Lesser Antilles. The optimal values of the α , β coefficients and of the KGE criteria are 1. The correlation coefficient is used to evaluate the linear relationship between the RGD and the rain gauges, the results vary between - 1 and + 1, where - 1 indicates a perfect negative correlation while + 1 indicates a perfect positive correlation. The α coefficient evaluates the dispersion of the RGD compared to the observed data. The β coefficient evaluates the bias of the RGD by measuring the average tendency of the RGD values to overestimate ($\beta > 1$) or underestimate ($\beta < 1$). The root mean square error is used as a measure of the average absolute error; an optimal value for RMSE is 0 mm/d.

Performances at the monthly and annual time steps

General performances of the RGD are also evaluated at the monthly and annual timesteps, by estimating R, α and KGE on monthly and annual time series (Kuentz *et al.*, 2015). Note that β has the same value on these different timescales.

6.6.2.2 Rainfall detection

Three categorical statistics criteria are used to evaluate the capacity for RGD to detect wet and dry days. There are four possible cases (Mashingia *et al.*, 2014) : i) the RGD detects rainfall that is really observed ; ii) the RGD detects rainfall that is not observed ; iii) the RGD does not detect rainfall that is observed ; and iv) the RGD and rain gauge do not detect any rainfall. Based on these cases, the following categorical statistics are evaluated :

- a. The probability of detecting rainfall (POD [-]),
- b. The false alarm rate (FAR [-]),
- c. The critical success index (CSI [-]).

The probability of detection measures the capacity of the RGD to correctly detect the rainfall observed, the results are between 0 and 1 (optimal value). The false alarm rate measures the proportion of days in which the RGD measures rainfall that was not observed by the rain gauges, results are between 0 (optimal value) and 1. The critical success index illustrates the fraction of observed rain that was correctly detected by the RGD, the optimal value of the critical success index is 1 (Alijanian *et al.*, 2017). Table A.5 (in appendix) lists the statistical metrics used to evaluate the RGD over the Lesser and the Greater Antilles.

6.6.2.3 Rainfall seasonality

Annual rainfall cycles are calculated with the 15-day aggregated rainfall data for the 103 reference rain gauges and on the RGD pixels corresponding to these reference data. Below the 15-day aggregation, the annual rainfall patterns are noisy and of little interest. The finest timescale relevant to present the annual rainfall pattern is the 15-day aggregation. The result is averaged over the Greater and the Lesser Antilles to highlight the annual rainfall pattern and to assess the ability of the RGD to reproduce the rainfall seasonality in the area study.

6.6.2.4 Heavy rainfall statistics

The ratios of the 90th and 99th rainfall percentiles and the maximum annual rainfall of each reference rain gauge to the corresponding RGD are calculated to estimate the ability of the RGD to assess heavy rainfall in the Greater and Lesser Antilles. A ratio greater than 1 indicates an overestimation of RGD and a ratio below 1 indicates an underestimation of RGD. Lastly, the summary statistics such as average, maximum and standard deviation were calculated for selected rainfall percentiles of the rainfall datasets.

6.7 Results

6.7.1 Evaluation of the RGD performances over 1980–2019

6.7.1.1 RGD general performance on a daily timescale

Figure 6.3 summarizes the performance of the RGD in estimating daily rainfall in the Greater and Lesser Antilles through the KGE criterion and its components (correlation coefficient, dispersion and bias) and the mean square error, using the 103 considered rain gauges. Overall, the performance over the Greater and Lesser Antilles are not significantly different. MSWEP is the most correlated with the reference data with a correlation coefficient of 0.5 in the Greater Antilles and slightly less in the Lesser Antilles. MSWEP has a good dispersion and a low bias, with α and β coefficients close to 1. These relatively good values of R, α and β coefficients combine to produce a relatively good KGE for MSWEP, with values between 0.45 and 0.5 in the Greater and Lesser Antilles. ERA-5 is the second most correlated RGD with the reference data with correlation coefficients between 0.35 and 0.4 but that, the dispersion around the mean value of ERA-5 is low (α near to 0.5) and a priori the estimates of ERA-5 are relatively uniform and are unable to capture heavy rainfall well, as shown in figure 6.8 and figure 6.9. ERA-5 underestimates the reference data with biases (β) between 0.65 and 0.75. This weakness in the dispersion around the mean value and underestimation of the reference rainfall makes ERA-5 the worst performing RGD, with KGE between 0.1 and 0.15. PERSIANN-CDR has a better KGE score than CHIRPS in the Lesser Antilles, mainly due to a better correlation of PERSIANN-CDR compared to CHIRPS. However, in the Greater Antilles, the R, α and β coefficients and thus the KGE scores of PERSIANN-CDR and CHIRPS are similar. Overall, the performance of CHIRPS in the Lesser and Greater Antilles is impaired by its low correlation coefficient with the reference data, but the lack of performance of ERA-5 is influenced by their low dispersion around the mean value (α near to 0.5). The RMSE coefficient is relatively low for ERA-5 and PERSIANN-CDR and is about 11 mm/d. In contrast, the RMSE coefficient is very high for CHIRPS and is about 17 mm/d.

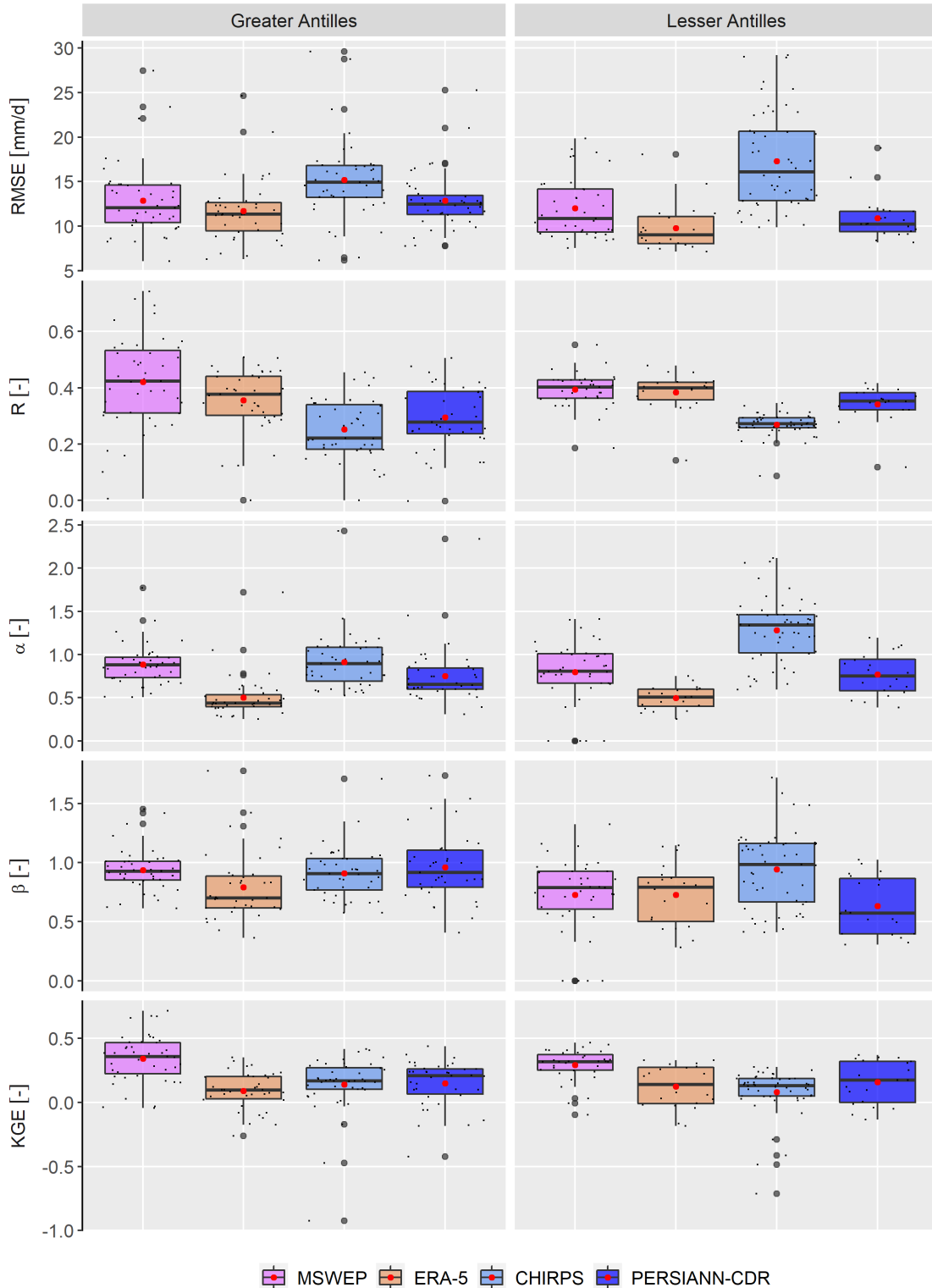


FIGURE 6.3 – General performance of the RGD on a daily timescale via 5 statistical metrics in the Greater Antilles and Lesser Antilles. These boxplots offer a summary of the distribution of the scores calculated on each of the 103 considered rain gauges : the center line indicates the median, the red point indicates the mean, the edges of the box are the 1st quartile and the 3rd quartile, the ends of the box define a threshold that cannot exceed 1.5 times the interquartile range, and the black points, if any, are points that are outside the threshold of the box.

Figure 6.4 shows a spatial representation of the performance results of the four RGD via the KGE statistical metric. In general, the KGE score tends to be relatively high in the Eastern Greater Antilles (Dominican Republic and Puerto Rico) in particular in Puerto Rico and in the North of the Lesser Antilles including Guadeloupe and the KGE score is relatively low in the West of the Greater Antilles, notably in Haiti and Jamaica, and in the North of the Lesser Antilles including Martinique. MSWEP shows the same spatial pattern in the Greater Antilles but the KGE scores are almost uniform in the Lesser Antilles and have no particular spatial pattern.

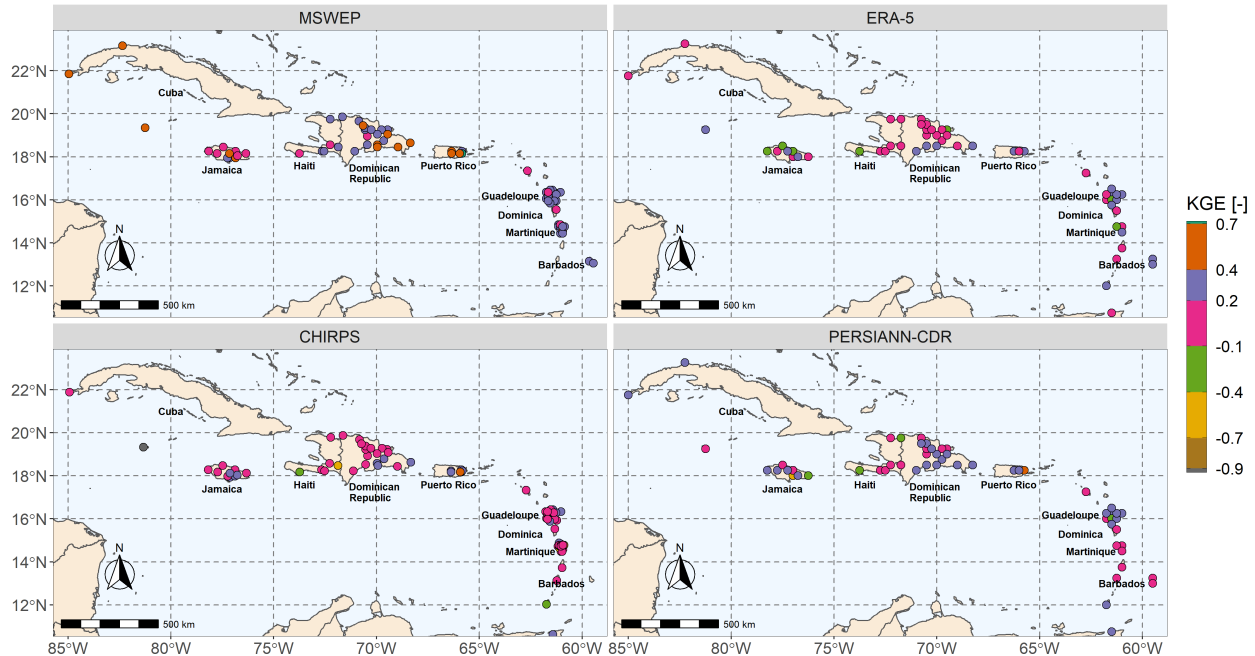


FIGURE 6.4 – Spatial distribution of KGE scores for 4 RGD in the Greater and Lesser Antilles

6.7.1.2 RGD rainfall detection capacity evaluation indices

The ability of the RGD to identify wet and dry days is presented in figure 6.5. ERA-5 then MSWEP have a good capacity to reproduce the rainy days observed on the ground for the Lesser and Greater Antilles ($POD > 0.9$ for ERA-5 and $POD > 0.75$ for MSWEP, that is, on all the wet days recorded by the rain gauge, 90 % were detected by ERA-5 % and 75 % by MSWEP). The false alarm rate is on average 0.5 in the Greater Antilles and 0.25 in the Lesser Antilles : out of all the wet days detected by an RGD, 50 % were not observed in the rain gauges of the Greater Antilles and 25 % in the Lesser Antilles. The fraction of rainfall observed and correctly detected by the RGD, represented by the CSI coefficient, was 0.5 for MSWEP and ERA-5 in the Greater Antilles and 0.65–0.7 for MSWEP and ERA-5 in the Lesser Antilles, and in the range of 0.25–0.30 for CHIRPS and PERSIANN. In summary, ERA-5 is the best performing RGD to identify wet and dry days before MSWEP with a very high POD and a similar CSI although FAR of ERA-5 is higher than MSWEP. In contrast, CHIRPS is the least efficient RGD to identify wet and dry days with low POD and CSI. These results are very important as these RGD may be used to calculate extreme climate indices such as the annual number of wet days above a certain threshold, annual number of wet days, or the maximum number of consecutive dry days and therefore the results obtained should be adjusted accordingly.

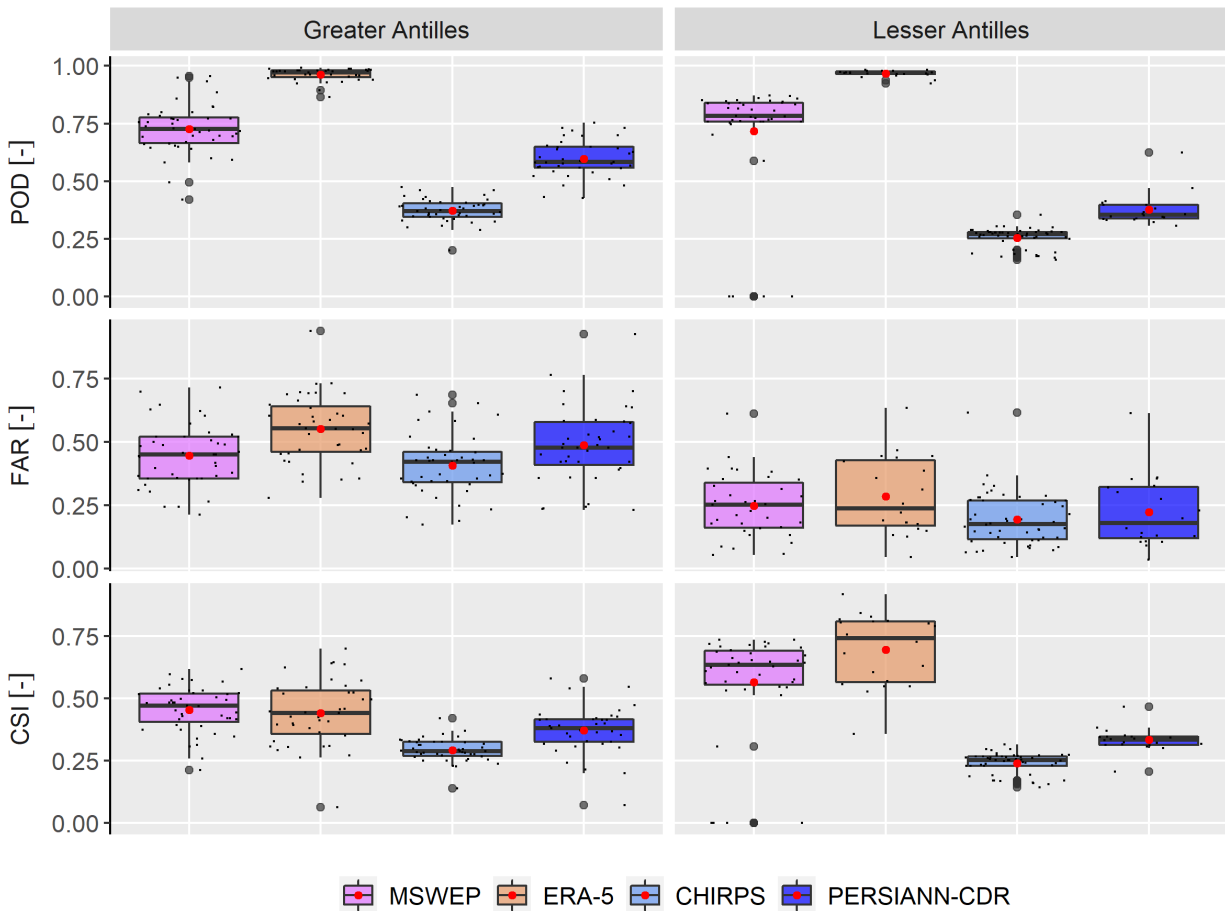


FIGURE 6.5 – RGD capacity to indicate dry and wet days with 3 categorical statistical metrics in the Greater Antilles and Lesser Antilles. These boxplots offer a summary of the distribution of the scores calculated on each of the 103 considered rain gauges : the center line indicates the median, the red point indicates the mean, the edges of the rectangle are the 1st quartile and the 3rd quartile, the ends of the lines define a threshold that cannot exceed 1.5 times the interquartile range, and the black points, when they exist, are points that are outside the threshold of the box.

6.7.1.3 RGD general performance on daily, monthly and annual timescales

In this section, we present, in addition to the daily timescale evaluated in sections 6.7.1.1 and 6.7.1.2, the ability of the RGD to estimate rainfall on monthly and annual timescales using the KGE criterion and their R , α and β components. The biases β is not shown in figure 6.6 because it is constant on daily, monthly and annual timescales. The dispersion α changes slightly on daily, monthly, and annual scales, with ERA-5 showing low dispersion around the mean value (relatively uniform rainfall) at all three timescales. Only the correlation coefficient affects the performance of the RGD at the three temporal scales studied. All RGD correlate very well with the reference rainfall data on a monthly scale with correlation coefficient values that reach, on average, 0.75 for MSWEP in the Greater Antilles and for all RGD in the Lesser Antilles. The correlation coefficients on an annual scale are slightly worse than those on a monthly scale but significantly better than the daily scale correlation coefficients ($R > 0.7$ at the monthly time scale and $R < 0.5$ at the daily time scale; see figure 6.6). Although the correlation coefficients of all RGD are better on monthly and annual scales, the KGE scores of ERA-5 in the Greater Antilles and ERA-5 and PERSIANN-CDR in the Lesser Antilles are significantly reduced because of their biases and their low α coefficient at daily, monthly and annual scales.

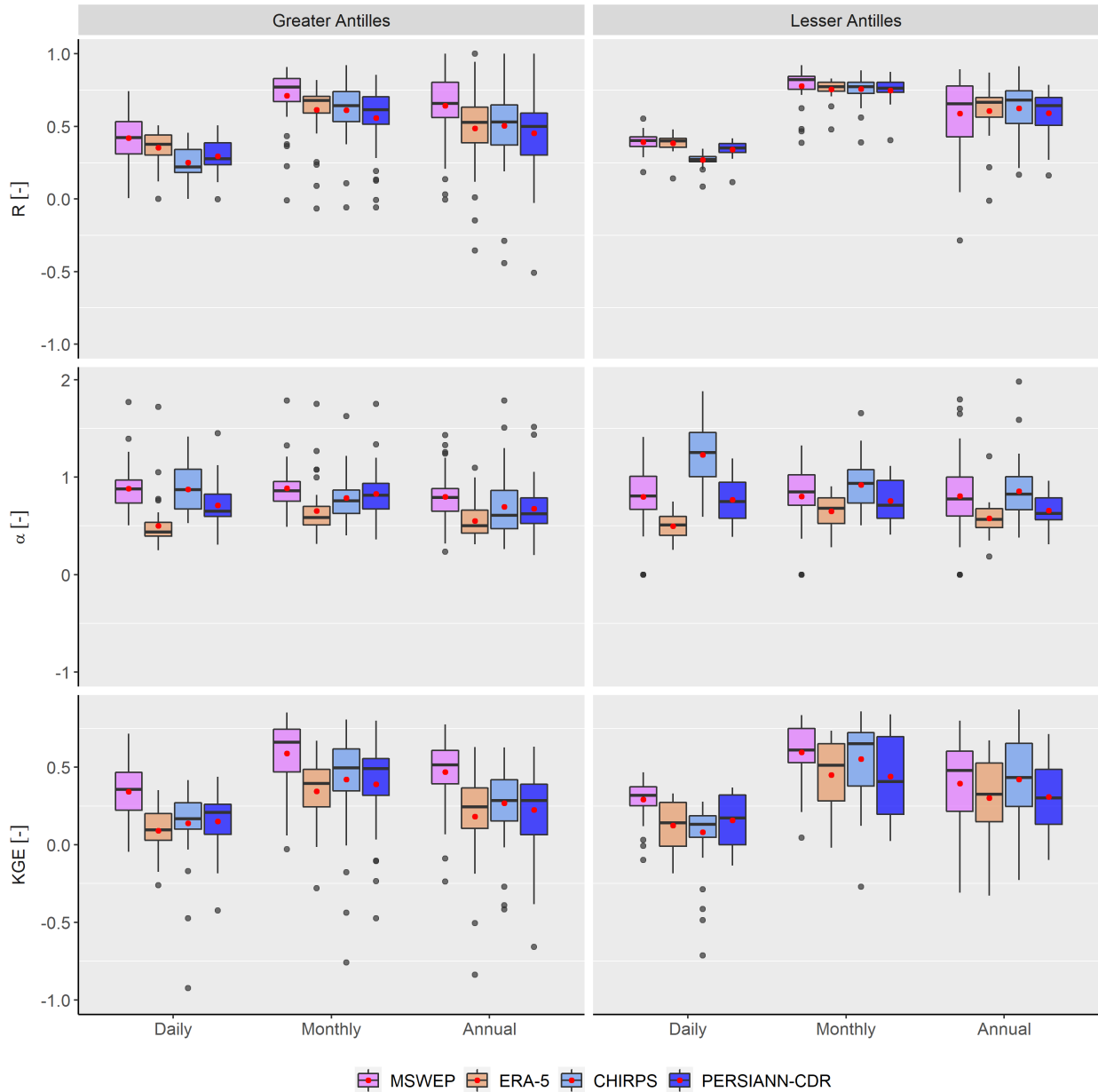


FIGURE 6.6 – RGD performance on daily, monthly and annual timescales using the KGE criteria in the Greater Antilles and Lesser Antilles. These boxplots offer a summary of the distribution of the scores calculated on each of the 103 considered rain gauges : the center line indicates the median, the red point indicates the mean, the edges of the rectangle are the 1st quartile and the 3rd quartile, the ends of the lines define a threshold that cannot exceed 1.5 times the interquartile range, and the black points, when they exist, are points that are outside the threshold of the box.

6.7.1.4 The annual rainfall cycle

The reference rainfall series as well as the corresponding RGD pixels were aggregated over a 15-day period, and the annual average rainfall cycle was calculated for each aggregated data series. Then, the annual rainfall cycles were averaged for the Greater and Lesser Antilles (see figure 6.7). The results show that the average annual rainfall cycle in the Greater Antilles is divided into 4 seasons with two rainfall peaks during the year. Winter dry season (WDS) from late November to mid-March with an average rainfall of 3 mm/d, early rainy season (ERS) from mid-March to mid-May with a peak rainfall of about 7 mm/d, mid-summer drought (MSD) from mid-May to early August which is a less rainy season interspersed between the two heavy rainy seasons with a rainfall of a little over 4 mm/d and late rainy season (LRS) from early August to late November with an average rainfall of 7 mm/d. These four seasons are also observed in the Lesser Antilles, however, with the MSD season being wetter than the ERS season. As a result, the Lesser Antilles has an increasing rainfall from WDS to reach a peak of about 8 mm/d in late October to early November. All the RGD have well captured the general pattern of the mean annual cycle well, with a bimodal precipitation cycle (a peak of rainfall in mid-May and a late rainy period from August to November) in the Greater Antilles and of the unimodal cycle in the Lesser Antilles. In the Greater Antilles, the rainfall amounts of the MSWEP, CHIRPS and PERSIANN-CDR from mid-May to early November are in very good agreement with the reference data, but these RGD underestimate the rainfall from November to early May. All RGD strongly underestimate rainfall in the Lesser Antilles except CHIRPS, which reproduces the annual rainfall cycle very well. ERA-5 and PERSIANN-CDR capture the amplitude of the rainfall in the Lesser Antilles very poorly.

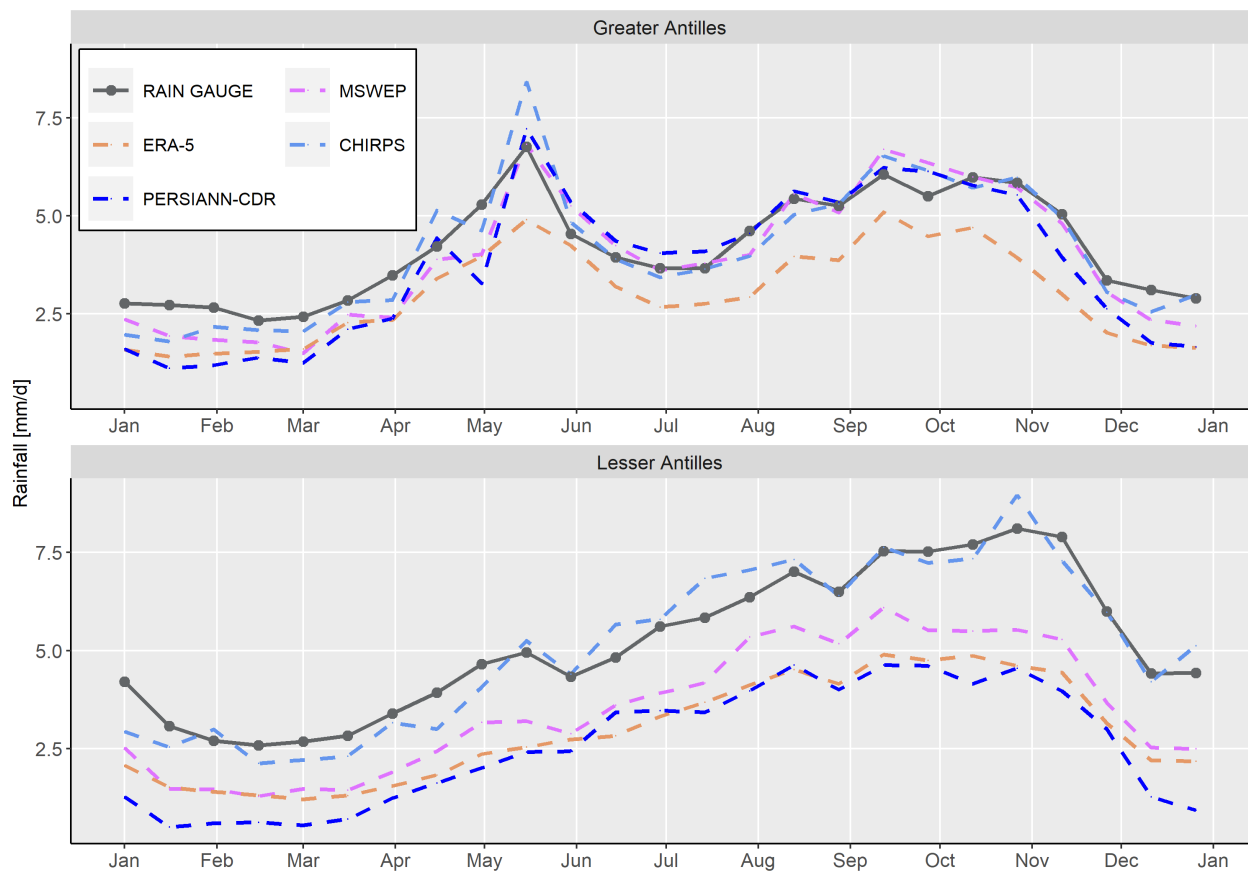


FIGURE 6.7 – Reference data and RGD annual rainfall cycle in the Greater Antilles and Lesser Antilles (1980–2019 period).

6.7.1.5 Heavy rainfall performance indices

In this section, we will present the ability of the studied RGD to estimate heavy rainfall accurately, by studying their 90th and 99th percentile rainfall and their maximum annual rainfall.

Figure 6.8 gives a spatial representation of the ratios, r , of 90th percentiles of the RGD estimates to the reference data and thus shows the areas where the 90th percentile rainfall is overestimated or underestimated by the RGD. Areas of underestimation ($r < 1$) of the reference data are represented by dots and areas of overestimation ($r > 1$) are represented by triangles. Overall, the RGD tend to slightly underestimate the 90th percentile rainfall in the study area and especially in the Lesser Antilles and the Eastern part of the Greater Antilles, but all the RGD systematically overestimate the reference data in the north of Haiti and south-east of Cuba, and sometimes in Jamaica. Although RGD tend to underestimate the 90th percentile rainfall, MSWEP and CHIRPS have a good ability to estimate the 90th percentile rainfall (r close to 1) in the eastern part of the Greater Antilles and in the northern part of the Lesser Antilles. This spatial variability of heavy rainfall is fairly well measured by CHIRPS with, however, an overestimation of the 90th percentile rainfall in the Lesser Antilles and a little less well by MSWEP with an underestimation of the heavy rainfall percentiles. ERA-5 and, to a lesser extent, PERSIANN-CDR strongly underestimate heavy rainfall percentiles and are unable to represent them spatially over the Greater and Lesser Antilles.

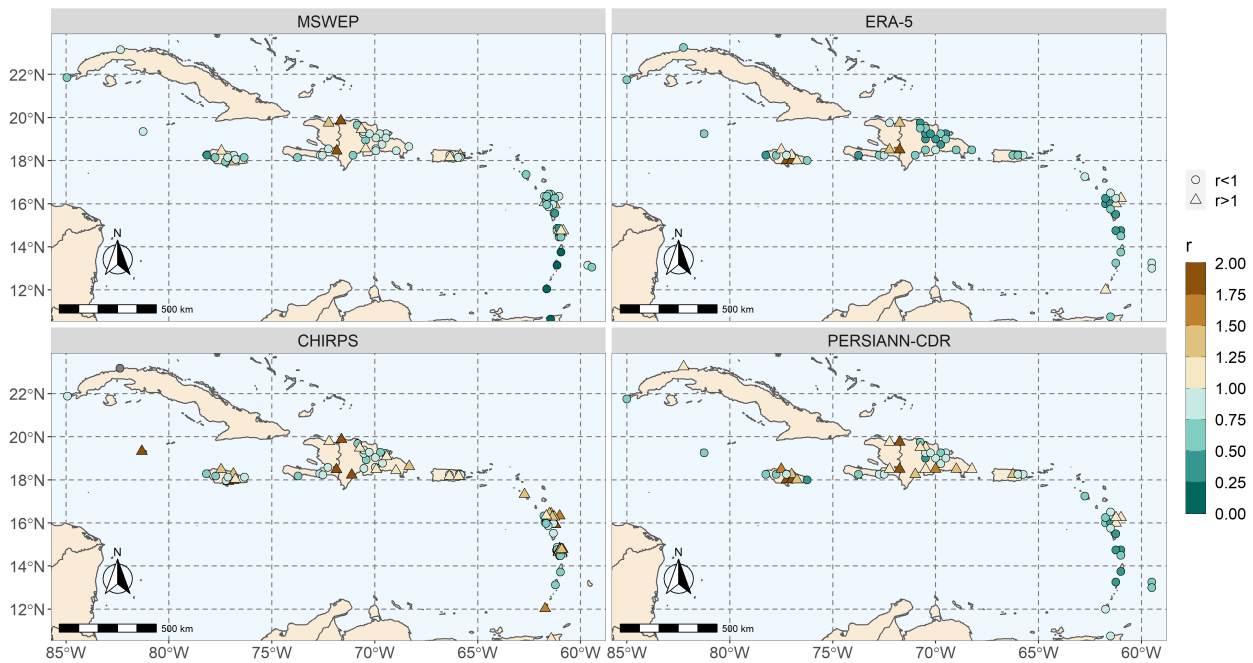


FIGURE 6.8 – Spatial distribution of the ratios (r) of 90th rainfall percentile of RGD to reference data in the Greater and the Lesser Antilles. Underestimation is represented by circles and overestimation is represented by triangles.

The results of the RGD performance in estimating heavy rainfall are summarized in figure 6.9. The gray horizontal line delineates the area where the RGD overestimate the reference percentiles (area above the line) from the area where the RGD underestimate the reference percentiles (area below the line). RGD are generally better at estimating heavy rainfall in the Greater Antilles than in the Lesser Antilles. CHIRPS and MSWEP perform well in estimating heavy rainfall percentiles in the Greater Antilles and somewhat less well in the Lesser Antilles. In general, all RGD tend to underestimate the 90th and 99th rainfall percentiles and the maximum annual rainfall in the Greater and Lesser Antilles except CHIRPS which overestimates these heavy rainfall percentiles in the Lesser Antilles. ERA-5 underestimates by half the percentiles of heavy rainfall in the Greater and Lesser Antilles and is the least efficient of the four RGD.

The 5 %, 25 %, 50 %, 75 % and 95 % rainfall percentiles are calculated for the 103 considered rain gauges and

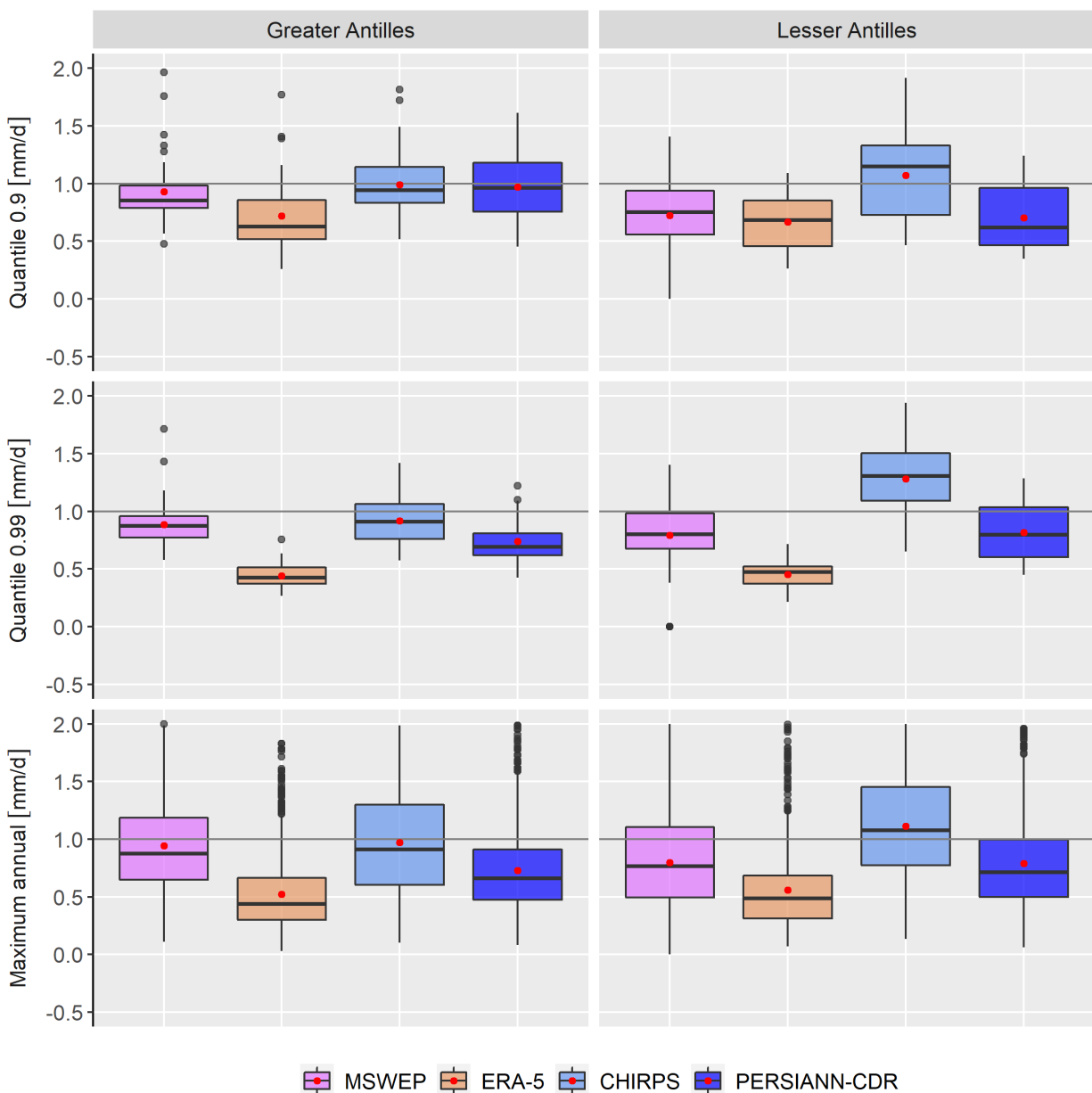


FIGURE 6.9 – Ratio of 90th and 99th rainfall percentiles and annual maximum rainfall of the RGD to the reference rainfall data in the Greater Antilles and Lesser Antilles. These boxplots offer a summary of the distribution of the scores calculated on each of the 103 considered rain gauges : the center line indicates the median, the red point indicates the mean, the edges of the rectangle are the 1st quartile and the 3rd quartile, the ends of the lines define a threshold that cannot exceed 1.5 times the interquartile range, and the black points, when they exist, are points that are outside the threshold of the box.

corresponding RGD pixels in the Greater and Lesser Antilles. The mean, maximum and standard deviation values of each rainfall database used are presented in table A.6 in appendix. The results show that on average more than 75 % of the days during our study period had rainfall less than 5 mm/d and these low rainfall events are well captured by ERA-5 and PERSIANN-CDR. In contrast, CHIRPS, MSWEP and PERSIANN-CDR tend to capture the heavy rainfall percentiles, with CHIRPS overestimating heavy rainfall percentiles and MSWEP and PERSIANN-CDR underestimating them. Although PERSIANN-CDR gives good estimates of heavy rainfall percentile values, it strongly underestimates the maximum values.

6.7.1.6 Performance of original and upscaled RGD

The statistical metrics described in the methodology section are computed for the RGD with their original spatial resolution (see subsections 6.6.1.2 and 6.6.2.1) and additionally computed for a shared spatial resolution upscaled to 0.25° . We present in figure 6.10 the results for two quantitative metrics (the RMSE and the KGE) and the three qualitative metrics (POD, FAR and CSI) for the original and upscaled MSWEP and CHIRPS RGD (the original ERA-5 and PERSIANN-RGD are already at 0.25° so they are not upscaled). A decrease of the RMSE values is observed for the upscaled RGD, which is much more pronounced for CHIRPS, especially in the Lesser Antilles. In general, we observe a decrease in the KGE metric for the upscaled RGD, except for CHIRPS in the Lesser Antilles. Overall, the upscaled RGD have a better ability to detect rainy days and dry days, represented by a higher POD and CSI, despite the fact that the FAR increased for CHIRPS in the Greater Antilles.

Figure 6.11 shows the rainfall regime pattern of the original and upscaled RGD. The patterns obtained at the 0.25° resolution are generally similar to these obtained at the original spatial resolution, with an overall underestimation of rainfall for the upscaled RGD. The rainfall is strongly underestimated, particularly in the rainy season (September to November) in the Lesser Antilles. Although the RGD underestimate the rainfall, they correctly capture the rainfall regime (see figure 6.11) for the two spatial resolutions. These results show that the rainfall regime pattern is more sensitive to the spatial scale variation of the RGD in the Lesser Antilles than in the Greater Antilles.

6.7.1.7 Performance of three rain gauges sets

The performance of the four RGD is evaluated using the sets of rain gauges described in Section 6.6.1.3. The first subset (subset 1, see figure 6.12) consists of 103 rain gauges excluding the 24 rain gauges used in MSWEP, the second subset (subset 2) consists of only the 24 rain gauges used in MSWEP, and the third subset consists of all the rain gauges (subset 1 + 2). The results are presented in figure 6.12 for the KGE criterion, which synthesizes the performance of three statistical metrics and is a good tool to evaluate the overall performance of the RGD (the results of all 5 quantitative statistical metrics for subsets 1 were presented in figure 6.3, while the results for subsets 1 + 2 are presented in the Appendix in figure A.2). Clearly, the performance of MSWEP is much better than the other three RGD for subset 2 (see figure 6.12), because these rain gauges are used to calibrate MSWEP. The ranks of performance of the RGD with subset 1 and subset 1 + 2 are similar, with a somewhat better performance of MSWEP with subset 1 + 2.

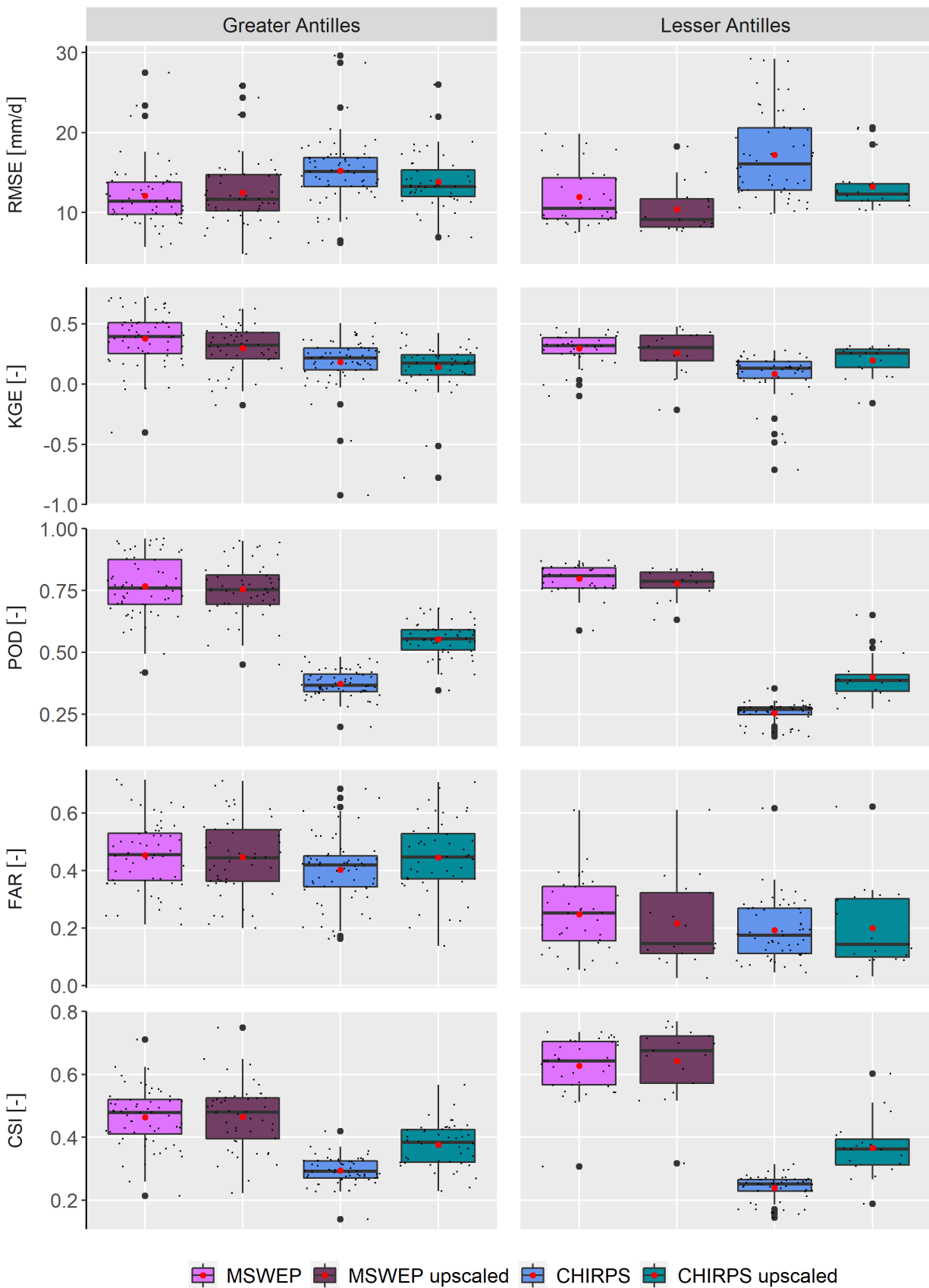


FIGURE 6.10 – Performances of the original and upscaled MSWEP and CHIRPS RGD.

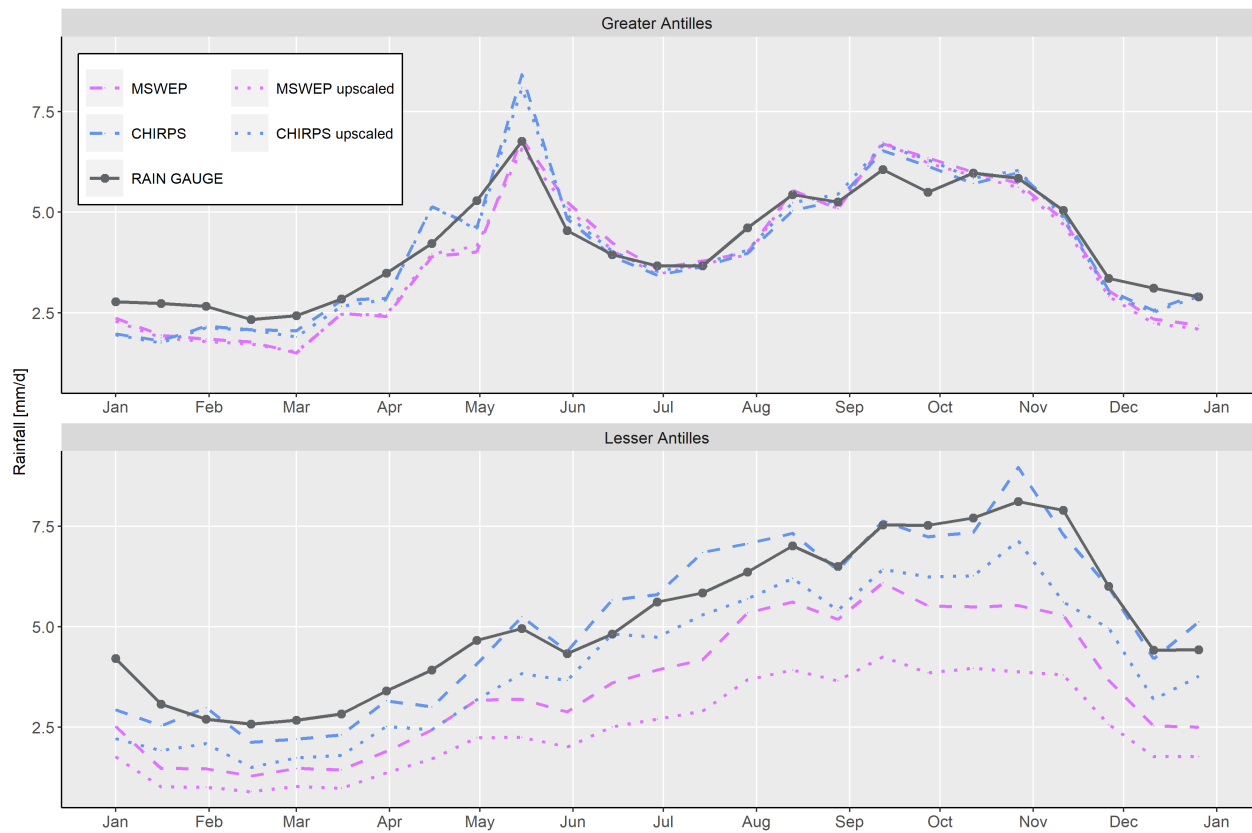


FIGURE 6.11 – Reference data and RGD annual rainfall cycle in the Greater Antilles and Lesser Antilles for the original RGD (left) and the upscaled RGD (right).

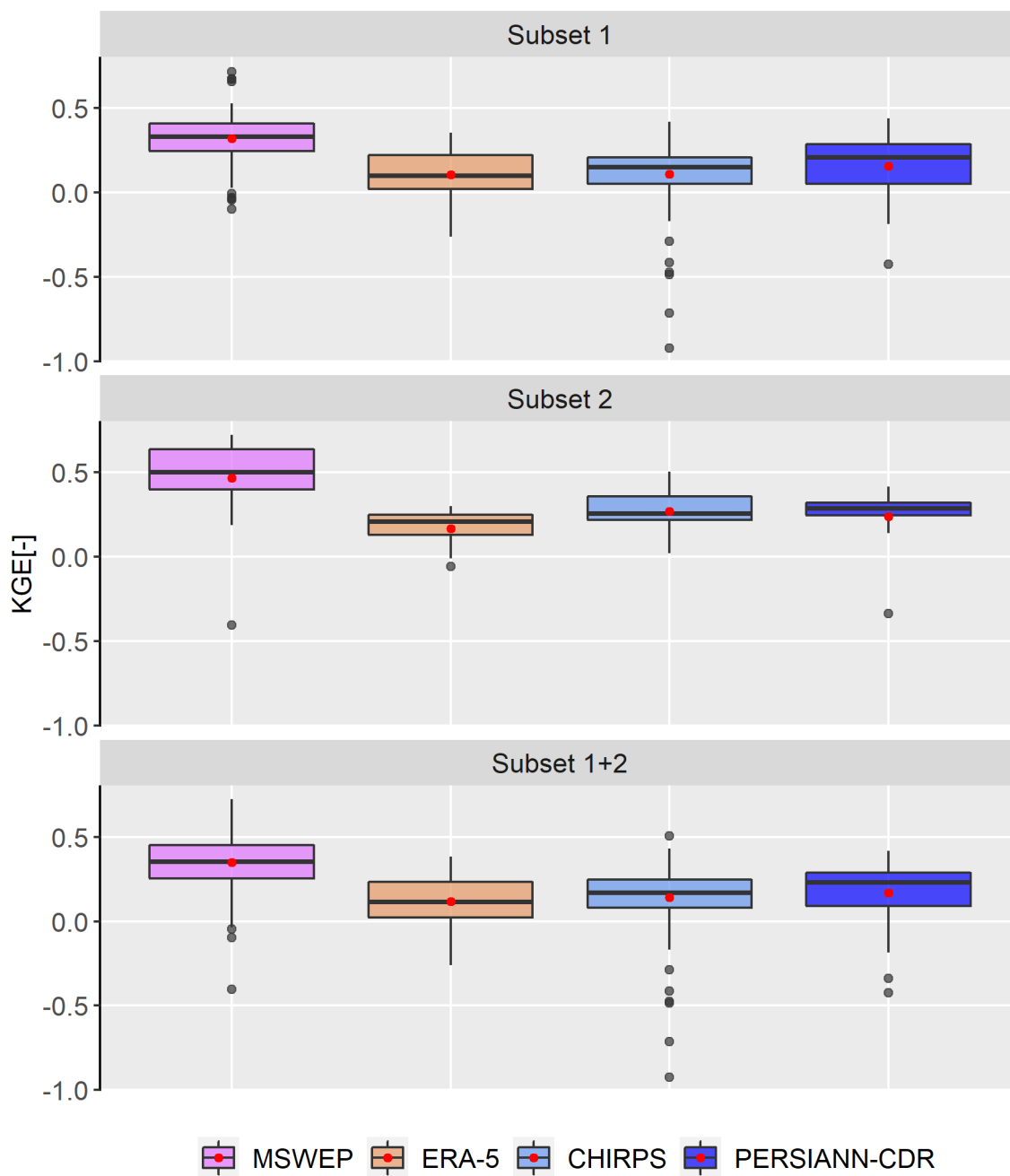


FIGURE 6.12 – KGE scores obtained by 4 RGD over both Greater and Lesser Antilles considering 3 subsets of rain gauges : subset 1 is composed by 103 rain gauges, subsets 2 consists in 24 rain gauges used in MSWEP, and subset 3 consists in all the 127 rain gauges.

6.7.2 Evaluation of the RGD performances over 2000–2019

Figure 6.13 presents the performance of the five RGD over 2000–2019 using five statistical metrics. The results shown in figure 6.13 do not show any significant difference in terms of MSWEP, CHIRPS, PERSIANN-CDR and ERA-5 RGD performance over the two time periods studied. GPM IMERG has difficulty to quantify rainfall volume in our study area, with the highest RMSE in the Greater Antilles, negative KGE in both the Greater Antilles and Lesser Antilles, and poorly represents heavy rainfall (not shown) although its performance is better than ERA-5 and PERSIANN-CDR. However, GPM IMERG has a good ability to detect rainy and dry days, with POD and CSI scores better than CHIRPS in the Greater Antilles and CHIRPS and PERSIANN-CDR in the Lesser Antilles.

GPM IMERG has difficulty representing the rainfall regime in the Greater and Lesser Antilles, as shown in figure 6.14. The May rainfall peaks are captured late (around June and sometimes early July) by GPM IMERG. November rainfall peaks in the Lesser Antilles are captured early (late August to early October) by GPM IMERG. In addition, GPM IMERG underestimates the rainfall pattern in the winter dry season (WDS) and overestimates the rainfall regime from May to November.

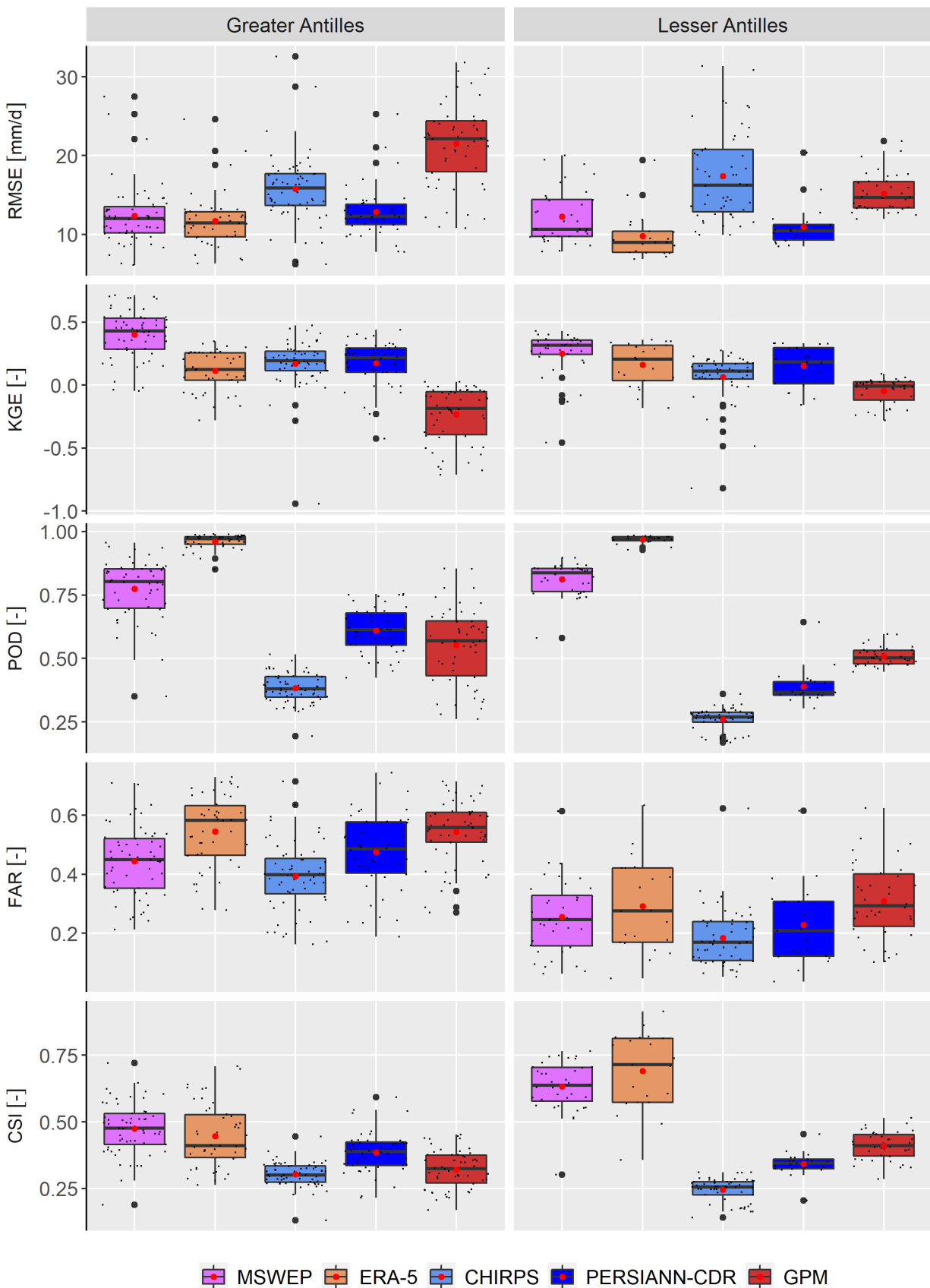


FIGURE 6.13 – Performance of the five RGD over 2000–2019.

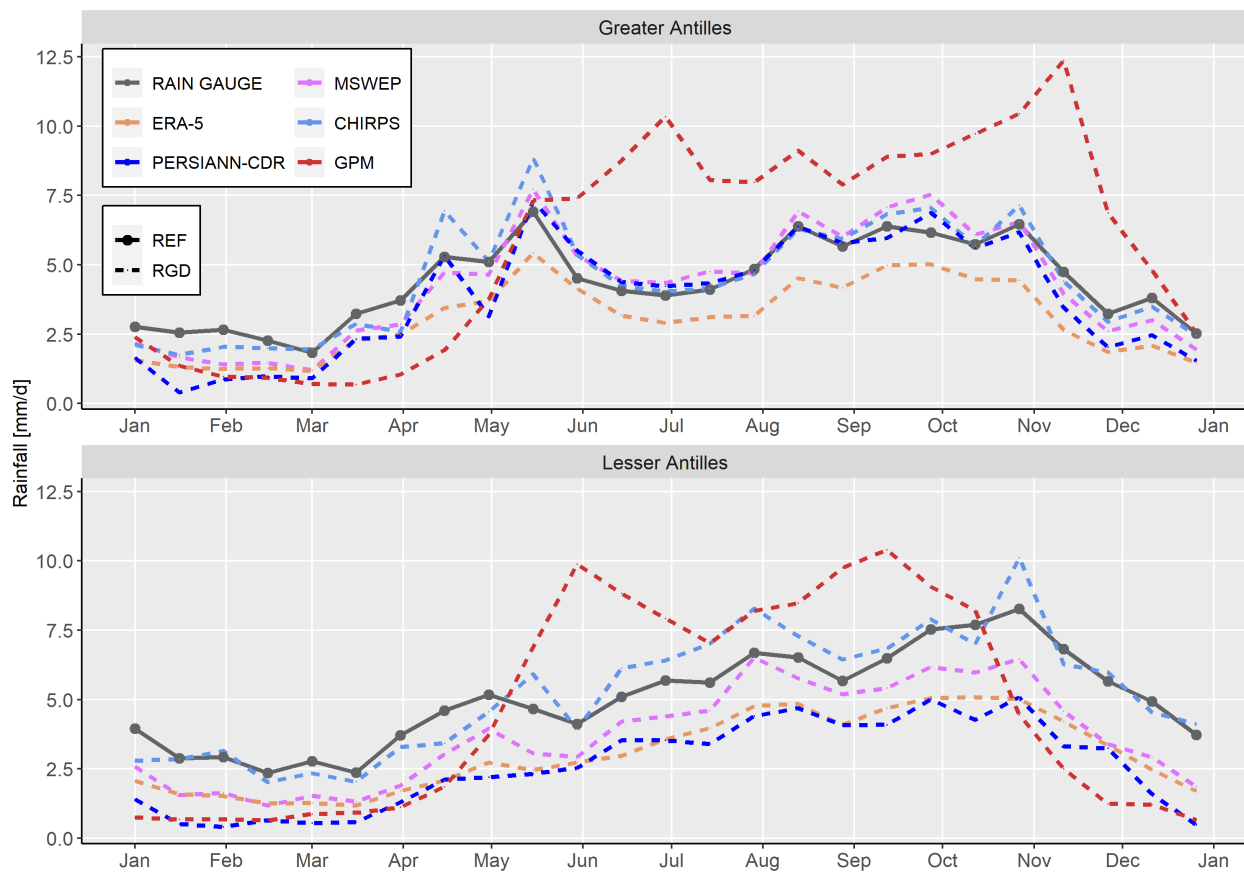


FIGURE 6.14 – Reference data and RGD annual rainfall cycle in the Greater Antilles and Lesser Antilles (2000–2019 period).

6.8 Discussion

6.8.1 Comparison of RGD performances

The performance of the RGD over the studied region reflects the philosophy behind their design. MSWEP was designed for operational research in hydrology to improve our understanding of hydrological processes and enhance hydrological model performance (Beck *et al.*, 2019). Thus, MSWEP has been produced by merging gridded rainfall data and daily rainfall data. Therefore, MSWEP performs well in most of the statistical metrics considered. CHIRPS is designed for monitoring extremes, which is why CHIRPS gives good estimates of heavy rainfall percentiles over the studied region. The performance of PERSIANN-CDR is poor over our study area. This poor performance of PERSIANN-CDR might be due to the data used to construct precipitation datasets. PERSIANN-CDR has used an algorithm based on artificial neural networks with trained by the stage IV radar data but this radar data itself is biased (Habib *et al.*, 2009; Sharif *et al.*, 2020). In addition PERSIANN-CDR used mainly infrared (IR) data that provide a measure of cloud top brightness temperature, which correlates with the probability of cloud precipitation (Brochart & Andréassian, 2014). But the performance of an IR-based algorithm is less accurate for some types of cloud : warm rain clouds and cold high cirrus, non-raining clouds (Ashouri *et al.*, 2015) Reanalysis products are designed to study climate variability on a large spatio-temporal scale and have wide application in atmospheric sciences. This explains the good ability of ERA - 5 to detect rainfall occurrences (high POD) but due to its too coarse spatial resolution, ERA-5 underestimates the rainfall amplitude in our study area.

The poor performance of GPM IMERG can be explained because it is a purely satellite-based RGD and does not use reference rain gauges to calibrate its estimates. Pradhan *et al.* (2022) have reviewed the performance of GPM IMERG at the global scale and show that GPM IMERG does not perform well to represent heavy and light rainfall, especially at the daily and sub-daily scales. Despite its limitations, the fine spatio-temporal resolution of GPM IMERG and its improvement with each new version (Pradhan *et al.*, 2022) reveals a promising path for current and future applications.

6.8.2 Are RGD limitations over Lesser and Greater Antilles site-specific ?

Although MSWEP is the best performing RGD, the general performances obtained over the Greater and Lesser Antilles are lower than performances obtained by MSWEP over other regions : in Southeast Asia (Tang *et al.*, 2019), Iran (Alijanian *et al.*, 2017) and Austria (Sharifi *et al.*, 2019), correlation coefficients obtained by comparing MSWEP and rain gauges at the daily timestep are generally greater than 0.75, while these correlation coefficients are less than 0.6 in the Caribbean. This can be explained by the fact that most satellite products have difficulty observing local convection systems in the Caribbean islands (Jury, 2009b).

The winter dry season (WDS ; see figure 6.7) in the Greater Antilles is underestimated by all four RGD while the other three seasons are well reproduced. These results corroborate the work of Brochart & Andréassian (2014) who showed that low rainfall tends to be underestimated by RGD in French Guyana.

The four RGD overestimate the rainfall percentiles in the area between the western part of Hispaniola and eastern Cuba (see figure 6.8). This corroborates the result of Jury (2009b) showing that remotely sensed rainfall products fail to capture the low rainfall area between Haiti, Cuba and Jamaica, due to the mountainous terrain rising to 2000 m in a northwest-southeast axis extending for 200 km, creating a significant wind and rain shadow towards Jamaica and Cuba.

The topography is very complex and influences the spatial pattern of rainfall. However, the rain gauges used in our study are mostly located in low-lying areas and this is of little relevance to study the relationship between topography and rainfall. The use of the Digital Terrain Model (DEM) in the Greater and Lesser Antilles to study the spatial variability of rainfall and to evaluate the performance of the RGD in relation to the topography is an interesting perspective.

6.8.3 Limitation of the point-to pixel comparison

The point-to-pixel comparison allows to compare the point data of the rain gauges to the area data of the RGD. The comparison of the performances of the original and upscaled RGD allows to evaluate the impact of the spatial resolution of the RGD on their performance and thus to evaluate the limit of the point-to-pixel approach. There was no clear trend in the impact of the spatial resolution of the RGD on their performance. For the two quantitative metrics used, we observed a decrease in KGE (except for CHIRPS in the Lesser Antilles), and an improvement in RMSE for the upscaled RGD. The RMSE strongly penalizes errors on heavy rainfall, but the RGD upscaled tend to smooth heavy rainfall and therefore, the RMSE is less penalizing with the RGD upscaled. This may explain the better RMSE score for the upscaled RGD. Therefore, caution should be used when evaluating the performance of RGD using RMSE (Baez-Villanueva *et al.*, 2018) as the results may not reflect the real performance of RGD. The ability of RGD to capture both rainy and dry days is improved for upscaled RGD. This can be explained by the RGD being averaged over a larger area and therefore having a higher number of rainy days than the original RGD. This could either increase the number of days of rainfall detected by the RGD and rain gauges and/or decrease the number of days of rainfall detected by the rain gauges and not by the RGD and therefore increase the POD and/or CSI.

The underestimation of rainfall cycle pattern by the RGD, particularly in the Lesser Antilles (see figure 6.11), can be explained by the spatial resolution of the RGD, which is too coarse compared to the surface area of the Lesser Antilles islands (e.g. 1128 km² for Martinique). Indeed, the largest spatial resolution of the RGD is 0.25° (more than 650 km²) which represents more than half the area of Martinique. The RGD rainfall is therefore averaged over too large an area and does not adequately capture the rainfall peaks and its spatial variability in this region.

6.8.4 Uncertainty of the reference rain gauge observations ?

The spatial patterns of the KGE score show that KGE scores are systematically higher in some countries (Puerto Rico and Martinique) than in others (Haiti and Jamaica for example) for all RGD. The results may well show a good performance of the RGD in the East of the Greater Antilles and the North of the Lesser Antilles. However, this result should be taken with caution as we have assumed that the observed rainfall series is the reference, without taking into account uncertainty of these reference series. Moreover, the best KGE scores are obtained for countries whose meteorological services have well documented and good quality reference data such as NOAA and Météo-France. Thus, there is a possibility that the spatial pattern of KGE scores may reflect countries with good quality reference data.

In our study, the effect of using a large number of reference rain gauges in the Lesser Antilles and a small number of reference rain gauges in the Greater Antilles was not evaluated, particularly on the underestimation of the rainfall cycle in the Lesser Antilles. Nevertheless, Centella-Artola *et al.* (2020) considered a larger number of rain gauges over the Greater Antilles and showed that RGD underestimate the rainfall cycle in the Lesser Antilles, particularly during the rainy season (September to November).

6.9 Conclusion

In this study, the performance of five Rainfall Gridded Datasets (RGD) - namely MSWEP, CHIRPS, PERSIANN-CDR, ERA-5 and GPM IMERG were evaluated using 103 rain gauges in the Lesser and Greater Antilles, with the aim of highlighting the qualities and shortcomings of these RGD on a daily timescale and to guide researchers in the choice of RGD to use for hydrometeorological applications in this study area. To our knowledge, this is the first work done on RGD data on daily timescale in this region. For hydrological applications in the Greater and Lesser Antilles or on a watershed scale, the use of MSWEP is recommended due to its high KGE score and high spatio-temporal resolution (0.1° and 3 h). On the other hand, CHIRPS, ERA-5, GPM IMERG and PERSIANN-CDR are not recommended due to their low KGE score and/or coarse spatial resolution, which are not appropriate for the Greater and Lesser Antilles countries. For climatological applications, mainly to calculate climatic indexes such as number of rainy days exceeding a threshold,

number of consecutive rainy days, etc. ERA-5, GPM IMERG and MSWEP are recommended due to their better POD and CSI scores. MSWEP, CHIRPS and PERSIANN-CDR are recommended in the Greater and Lesser Antilles for research on water resources management for irrigation, energy production, industry, etc. due to their ability to represent the annual rainfall seasonality. For applications on heavy rainfall statistics, CHIRPS and MSWEP are recommended for their good capacity to estimate the percentiles of heavy rainfall. In summary, MSWEP is recommended for most hydrometeorological applications in the study area because of its good performance for almost all statistical metrics and its good spatio-temporal resolution.

This work provides a guide to users of rainfall data in the Lesser and Greater Antilles on their choice of RGD to use in countries with very limited rainfall data, such as Haiti, taking into account the benefits and drawbacks of each RGD. The evaluation of these RGD performances might be extended on the studied region using other validation metrics based on different parameters such as satellite-derived soil moisture products or rainfall-runoff modeling (Gampe & Ludwig, 2017; Musie *et al.*, 2019). No tests have evaluated the RGD performance in measuring light rainfall, which would be useful for drought monitoring. This work could be a good direction for future research. Finally, the use of such RGD as inputs of rainfall-runoff models for flood forecasting, flood mapping or hydraulic structure design is an interesting application of this work.

6.10 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis d'évaluer la performance de cinq produits de pluies maillées au pas de temps journalier dans les Grandes et les Petites Antilles. Huit métriques statistiques ont été utilisées pour comparer les quantités de pluies des pluviomètres de référence à celles des produits de pluies maillées et pour évaluer la capacité des produits de pluies maillées à identifier les jours de pluies et les jours sans pluie. Les régimes de pluies obtenus avec les pluviomètres de référence ont été comparés avec ceux obtenus avec les produits de pluies maillées. Enfin, les quantiles 90% et 99% et les pluies maximales annuelles obtenus avec les pluviomètres de référence ont été comparés à ceux obtenus avec les produits de pluies maillées.

Les principaux résultats sont synthétisés à la figure 6.15 et résumé ci-après. MSWEP est relativement performant pour la plupart des métriques statistiques et a donc été recommandé pour la plupart des études hydro-météorologiques dans la région étudiée. Les produits CHIRPS et PERSIANN-CDR sont performants dans l'estimation de la saisonnalité des pluies et sont également recommandés pour les études portant sur l'évaluation et la gestion des ressources en eau. Le produit CHIRPS est aussi performant dans l'estimation des quantiles de fortes pluies et est également recommandé pour les études statistiques des événements de fortes pluies. Enfin, les produits ERA-5 et GPM-IMERG ont une bonne capacité à capturer les jours humides et les jours secs et peuvent être utilisés pour déterminer certains indices climatiques. Cependant, des méthodes de réduction de biais pour ces ensembles de données maillées sont conseillées, avant leurs applications, même pour ceux les plus performants, en raison de leur faible score KGE et leur RMSE relativement élevé.

Pluviométrie dans les Grandes et les Petites Antilles :
performance de cinq jeux de données de pluies maillées à l'échelle journalière

Objectifs	Méthodologies	Résultats					
		MSWEP	CHIRPS	PERSIANN-CDR	ERA-5	GPM IMERG	
<ul style="list-style-type: none"> Évaluation de la performance des produits de pluies MSWEP, CHIRPS, PERSIANN-CDR, ERA-5 et GPM IMERG au pas de temps journalier. Mettre en évidence les qualités et les lacunes de chacun des cinq bases de données pluviométriques. Guider les chercheurs et les praticiens dans le choix de la base de données appropriée à utiliser pour les applications hydrométéorologiques. 	<ul style="list-style-type: none"> Évaluation de la performance des cinq produits de pluies à l'aide de 5 métriques statistiques : KGE et ses trois composantes et RMSE. Évaluation de la capacité à détecter les jours humides et secs à l'aide des métriques POD, FAR et CSI. Évaluation de la capacité à reproduire la saisonnalité des pluies. Évaluation des quantiles de pluies 90% et 99% et les pluies maximales annuelles. 	Performance journalière	✓	✗	✓	✗	✗
		Détection des jours humides et secs	✓	✗	✗	✓	✓
		Saisonnalité des pluies	✓	✓	✓	✓	✗
		Fortes pluies	✓	✓	✗	✗	✗
		<p>Conclusion : MSWEP obtient de bons résultats pour la plupart des mesures statistiques et est recommandé pour les études hydrométéorologiques dans cette région.</p>					

FIGURE 6.15 – Synthèse des avantages et des inconvénients des cinq produits de pluies dans les Grandes et les Petites Antilles (Bathelemy *et al.*, 2022).

Chapitre 7

Analyse spatio-temporelle des pluies et des débits sur la période 1979-2017

7.1 Objectifs de ce chapitre

Ce chapitre propose d'étudier la variabilité spatio-temporelle et de faire une analyse fréquentielle des pluies et des débits des bassins versants haïtiens sur la période 1979-2017. Les données de pluies maillées MSWEP ont été utilisées comme données de pluies de référence en Haïti sur la période 1979-2017, car c'est la base de données de pluies la plus performante dans la région des Antilles (voir le chapitre 6).

Ainsi, une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie a été réalisée avec la base de donnée de pluies MSWEP. Ensuite, cette base de données a été utilisée pour étudier les épisodes de fortes pluies associés aux événements majeurs identifiés par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017) dans un premier temps, et l'ensemble des épisodes de fortes pluies identifiés dans cette base de données de pluies dans un second temps.

Cette base de données de pluies maillées a ensuite été utilisée en entrée du modèle pluie-débit journalier GR4J (Perrin *et al.*, 2003) en utilisant les paramètres obtenus à partir des données historiques (Bathelemy *et al.*, 2023a) pour simuler des séries de débits sur la période 1979-2017 pour 21 bassins versants haïtiens.

Enfin, les séries de débits simulés et la base de données de pluies MSWEP ont été utilisées pour prédéterminer des valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour pour 21 bassins versants à partir des lois statistiques Gumbel (Gumbel, 1958) et GEV (Beirlant *et al.*, 2004; Coles, 2001; Jenkinson, 1955) et la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967).

7.2 Variabilité spatio-temporelle des pluies en Haïti sur la période 1979-2017

7.2.1 Objectifs de cette partie

Cette section propose, en se basant sur les résultats de l'analyse comparative de différents produits de pluies, d'analyser la pluviométrie en Haïti sur la période 1979-2017 à partir du produit MSWEP, en se concentrant d'abord sur la variabilité spatio-temporelle de la pluie annuelle et du régime de la pluie. Ensuite, les épisodes de fortes pluies ont été analysés en étudiant premièrement les 33 épisodes de pluies associés aux inondations majeures listées par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017). Ensuite, un ensemble d'épisodes pluvieux forts a été identifié automatiquement avant d'être analysé.

7.2.2 Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude sont :

1. la deuxième version du produit de pluies MSWEP (Beck *et al.*, 2019) disponible sur la période 1979-2017 à une résolution spatiale de 0.1°(111 km à l'équateur) et une résolution temporelle de 3 h (voir la section 6.5.2.3).
2. les huit types de temps atmosphériques dans les Caraïbes identifiés par Moron *et al.* (2016) (voir la section 3.2.1.3).
3. des informations concernant les inondations dévastatrices (dates et zones impactées) listées par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017), et des informations liées aux cyclones (trajectoires, catégories, dates etc.) disponibles sur le site de la NOAA ¹.

7.2.3 Méthodologie

7.2.3.1 Variabilité interannuelle et infra-annuelle des pluies

La pluie moyenne annuelle en Haïti a été cartographiée, avec les données de pluies MSWEP, dans le but de mettre en évidence la forte variabilité spatiale de la pluviométrie en Haïti (voir la section 3.2.2) et d'identifier les zones où la pluviométrie est plus ou moins homogène. Ensuite, le régime de pluies et la variabilité interannuelle des cumuls annuels ont été calculés pour chacune des zones identifiées. Enfin, la variabilité interannuelle des cumuls de pluies de chacune des 4 saisons (WDS, ERS, MSD et LRS) décrites à la section 3.2.1.1 a été étudiée. Cette dernière analyse peut être très utile pour les secteurs d'activités qui dépendent de la saisonnalité des pluies, comme l'agriculture par exemple.

7.2.3.2 Caractérisation des épisodes de pluies qui ont provoqué des inondations

Les épisodes de pluies (en période cyclonique et hors cyclone) ayant conduit aux inondations dévastatrices listés par le BRGM ont été caractérisés en étudiant leurs cumuls de pluies et les types de temps associés. Les durées de ces épisodes ont été estimées "grossièrement" comme étant les différences entre les dates de fin et de début des événements tels que rapporté par le BRGM (Terrier *et al.*, 2017). Par exemple, Terrier *et al.* (2017) a identifié un épisode pluvieux le 23 et 24 mai 2004. De ce fait, la durée de cet épisode est considérée comme étant égale à 2 jours. Ainsi, les épisodes de pluies en période cyclonique ont des durées de 2 à 4 jours, et les épisodes de pluies hors cyclone ont des durées de 1 à 2 jours.

Aucune donnée de pluviomètre de référence n'existe, données qui permettraient d'évaluer la capacité de MSWEP à bien capturer ces épisodes de pluies. De ce fait, une comparaison qualitative entre les cumuls de pluies MSWEP et les départements les plus affectés par les inondations a été réalisée, dans le but d'analyser la cohérence spatiale entre les régions où les cumuls ont été les plus élevés et les régions réellement inondées.

Une cohérence spatiale entre les cumuls de pluies et les régions réellement inondées est considérée bonne si :

1. Les plus forts cumuls sont localisés dans les départements inondés pour les inondations hors cyclones.
2. Les plus forts cumuls sont relativement proches des trajectoires des cyclones, et localisés dans les départements inondés pour les inondations liées aux cyclones.

Enfin, le type de temps atmosphérique dominant a été identifié pour chacun de ces épisodes de pluies. En effet, chaque jour de la période 1979-2017 a été affecté à l'un des huit types de temps atmosphériques définis par Moron *et al.* (2016). Le type de temps dominant est défini comme le type de temps de plus fréquent pendant la durée de l'épisode pluvieux.

1. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>, consulté le 16 octobre 2023.

7.2.3.3 Caractérisation de l'ensemble des épisodes de fortes pluies identifiés dans MSWEP

Une analyse supplémentaire a été réalisée en identifiant automatiquement les pluies les plus fortes dans la base de données MSWEP (Beck *et al.*, 2019). Un seuil à partir duquel un épisode de pluies est considéré comme un épisode de fortes pluies a été défini, et ces épisodes de fortes pluies ont été caractérisés en étudiant leurs cumuls, leurs durées et leurs variabilités spatio-temporelles.

Le seuil de 50 mm utilisé au chapitre 5 a été repris dans cette étude. Ce seuil a été discuté à la section 5.2.4.6 et est de nouveau discuté à la section 7.2.4.3. Ainsi, les épisodes de fortes pluies tels que définis dans cette section, sont des épisodes dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm.

Un épisode pluvieux a été défini en fonction de trois paramètres : sa date de début, sa date de fin et un intervalle de temps minimal garantissant l'indépendance entre deux épisodes. Ainsi, un épisode pluvieux commence au pas de temps où la pluie est non nulle sur au moins un pixel et nulle sur tous les pixels au pas de temps précédent. Un épisode pluvieux prend fin au pas de temps où la pluie est non nulle sur au moins un pixel et nulle sur tous les pixels au pas de temps suivant. Le pas de temps considéré dans cette étude est 3h car c'est le pas de temps pour lequel les données MSWEP sont disponibles. La pluie nulle est considérée comme une pluie inférieure à 0.1 mm. Deux épisodes pluvieux dont l'intervalle de temps séparant la fin du premier et le début du deuxième est inférieur à 24 h sont fusionnés en un seul épisode pluvieux.

Les épisodes de pluies ayant des cumuls de pluies supérieurs au seuil sur au moins un pixel ont été retenus comme les épisodes de fortes pluies. Les positions géographiques des pixels ayant les cumuls maximums ont été cartographiés dans le but de mettre en évidence les régions les plus à risque. La saisonnalité ainsi que la variabilité interannuelle du nombre d'épisode par année ont été étudiées. La variabilité interannuelle des durées moyennes annuelles et des cumuls annuels des épisodes de fortes pluies a aussi été étudiée. Enfin, le type de temps atmosphérique dominant a été identifié pour chacun de ces épisodes de fortes pluies.

7.2.4 Résultats

7.2.4.1 Variabilité interannuelle et infra-annuelle des pluies en Haïti

La variabilité spatiale de la pluie moyenne annuelle, présentée à la figure 7.1, et calculée avec les données MSWEP est similaire à celle présentée par Moron *et al.* (2015) (voir la section 3.2.2). Ainsi, Haïti peut être divisé en quatre zones ayant des caractéristiques de pluies similaires. Par ordre de cumuls de pluies décroissants, on distingue :

1. la *zone 1*, qui est formée par les départements de la Grande Anse, de la partie ouest des départements du Sud et des Nippes, et ayant une pluviométrie moyenne autour de 1900 mm/an.
2. la *zone 2*, qui est formée par les départements du Nord, du Nord-Est et du Centre, et ayant une pluviométrie moyenne autour de 1550 mm/an.
3. la *zone 3*, qui est formée par les départements du Sud-Est, de la partie sud du département de l'Ouest et de la partie est des départements du Sud et des Nippes, et ayant une pluviométrie moyenne autour de 1350 mm/an.
4. la *zone 4*, qui est formée par les départements du Nord-Ouest, de l'Artibonite et de la partie nord du département de l'Ouest (plaine du Cul de Sac et île de la Gonâve), et ayant une pluviométrie autour de 1100 mm/an.

Les pluviomètres du *cluster 1* défini par Moron *et al.* (2015) (voir la section 3.2.2) sont localisés dans la *zone 4* et ceux du *cluster 4* sont localisés dans la *zone 2*. Les pluviomètres du *cluster 2* et du *cluster 3* sont repartis sur l'ensemble du territoire haïtien et n'ont pas de lien avec les quatre zones définies.

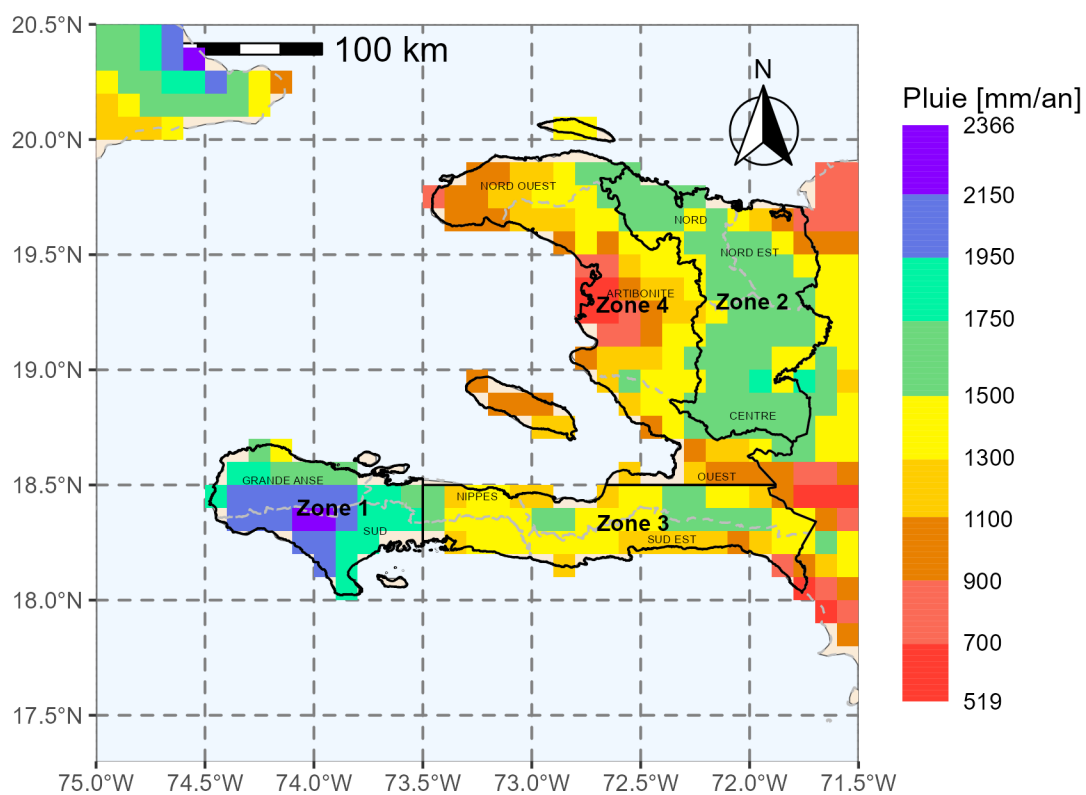


FIGURE 7.1 – Variabilité spatiale des pluies moyennes annuelles en Haïti calculées avec les données MSWEP sur la période 1979-2017.

Les causes de cette variabilité spatiale de la pluie en Haïti ont été discutées par Moron *et al.* (2015) et sont liées principalement au vent d'est dominant et aux brises de terre et de mer. Les départements de la *zone 2* sont situés du côté d'où viennent les alizés et sont donc plus humides. Les chaînes de montagnes d'orientation nord-ouest sud-est dans le nord d'Haïti (voir la section 1.2) favorisent un soulèvement des alizés (Brinkmann, 1971) qui provoque une augmentation des pluies dans les départements de la *zone 2*. Les masses d'air ainsi dépourvues de leurs humidités sont responsables de la diminution de la pluie dans les départements de la *zone 4*. La forme allongée de la presqu'île du sud et le relief accidenté favorisent les brises de mer et de montagnes responsables des fortes pluies dans les départements de la *zone 1*.

La figure 7.2 présente la variabilité temporelle de la pluviométrie annuelle MSWEP pour chacune des quatre zones. La pluviométrie de la période 1980-1997 est globalement inférieure à la moyenne sur l'ensemble des quatre zones. Néanmoins, les années 1993 et 1994 sont très humides dans le Sud, les Nippes et la Grande Anse. Cela peut être lié à des événements particuliers, par exemple le cyclone Gordon qui a affecté la presqu'île du sud en 1994. Cette période de faible pluie en Haïti, et plus généralement dans l'ensemble des Caraïbes, est bien documentée par certains auteurs (voir les sections 3.2.1.1 et 3.2.2) bien qu'il existe des contradictions entre certaines années sèches et humides. Une période humide est observée pendant la période 2006-2012, à l'exception de 2009. Cette période humide est beaucoup plus marquée pour les zones 1 et 3 (partie sud d'Haïti). 2013 à 2015 sont des années particulièrement sèches dans les zones 1 et 3. 2016 fait partie des années les plus humides, principalement grâce au cyclone Matthew dont le cumul de pluie a atteint plus de 700 mm dans la zone 1 (voir la figure 7.6).

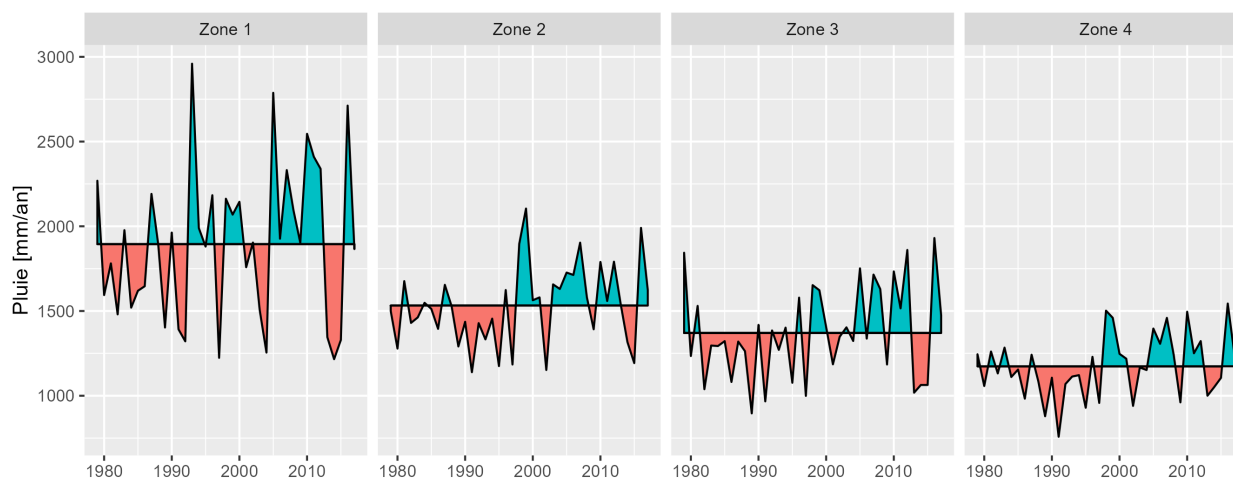


FIGURE 7.2 – Variabilité interannuelle des pluies moyennes annuelles des quatre zones de pluies homogènes, calculée avec les données MSWEP sur la période 1979-2017. La ligne horizontale noire représente la pluie moyenne annuelle sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles la pluie annuelle est supérieure à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles la pluie annuelle est inférieure à la moyenne.

La pluviométrie moyenne mensuelle des quatre saisons de pluies caribéennes (WDS, ERS, MSD et LRS ; voir la section 3.2.1.1) est présentée à la figure 7.3. La saison hivernale (WDS) est marquée par une pluviométrie relativement faible par rapport aux trois autres saisons. La saison de pluie d'automne (LRS) semble être plus humide que la saison de pluie au printemps (ERS) dans la zone 1, et c'est l'inverse dans la zone 2, où l'ERS semble être plus humide. La pluviométrie mensuelle des saisons ERS, MSD et LRS est très proche dans la zone 3 et aussi dans la zone 4.

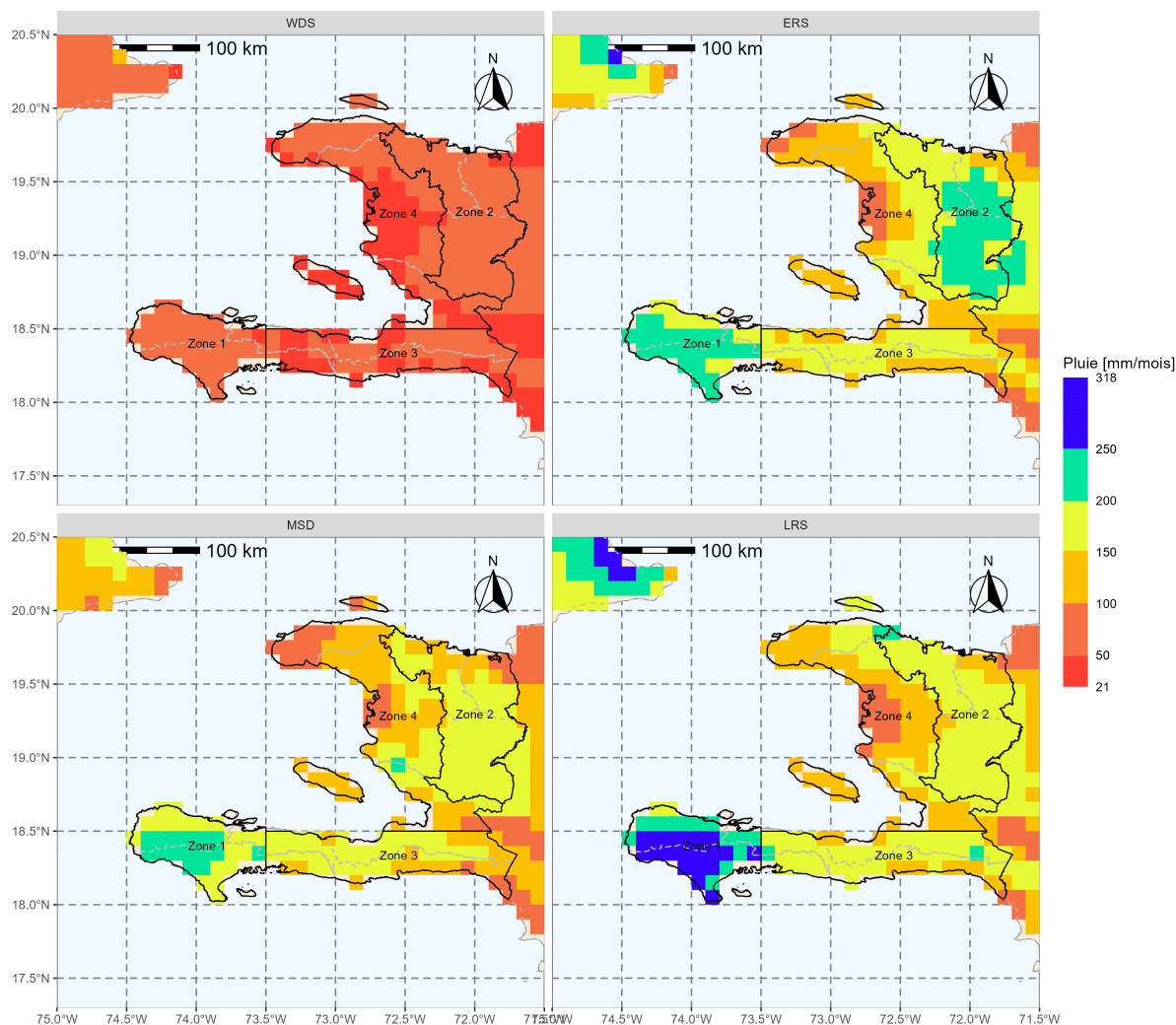


FIGURE 7.3 – Variabilité spatiale des moyennes des cumuls de pluies de chacune des quatre saisons de pluies caribéennes, calculés avec les données MSWEP sur période 1979-2017.

Les régimes de pluies des 4 zones sont présentés à la figure 7.4 sous forme de boîte à moustaches, où chaque boîte à moustaches représente les cumuls de pluies sur la période 1979-2017 pour un mois donné. Les résultats montrent que le cycle bimodal de pluies est bien marqué pour les zones 1 et 2, avec une diminution relative de pluie pendant la MSD intercalée entre l'ERS et la LRS. Les zones 3 et 4 ont un cycle de pluie unimodal qui s'étend d'avril à novembre (ERS et LRS faible). Les deux mois de transitions des saisons humides à sèches (avril et août) et les deux mois de transition des saisons sèches à humides (juin et novembre) discutés à la section 5.2.4.2 sont bien représentés dans la figure 7.4.

La figure 7.5 montre que la saison sèche WDS a tendance à être légèrement plus sèche au cours du temps et les saisons humides, particulièrement la MSD et la LRS, ont tendance à être légèrement plus humides au cours du temps.

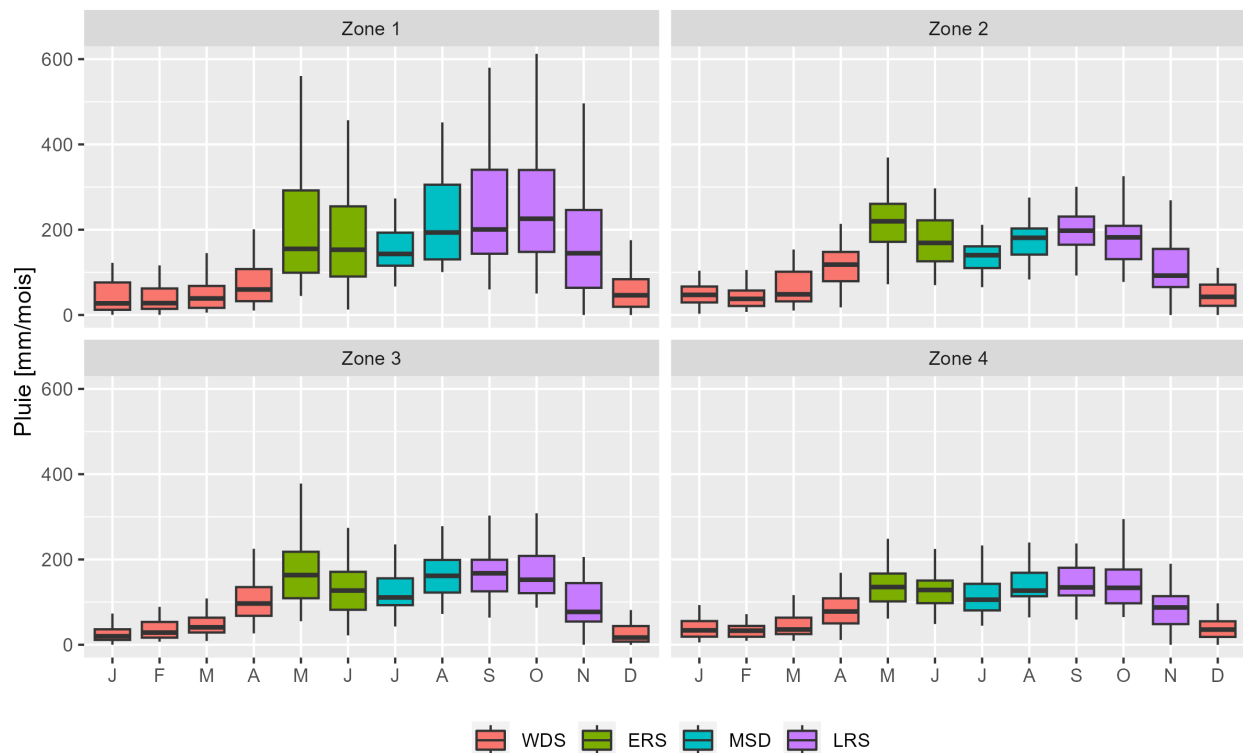


FIGURE 7.4 – Régimes des pluies des 4 zones de pluies homogènes, estimés avec les données MSWEP, sur la période 1979-2017.

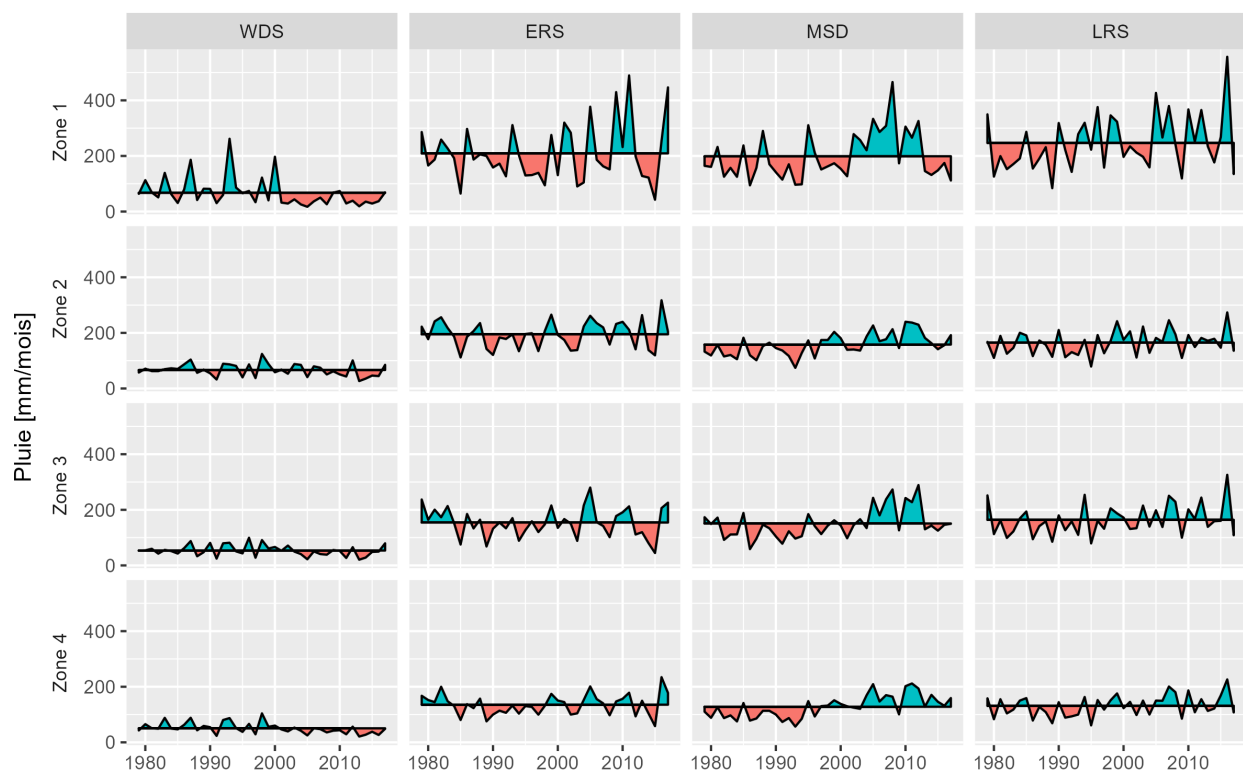


FIGURE 7.5 – Variabilité interannuelle des cumuls de pluies par saisons et par zones, calculés avec les données MSWEP sur la période 1979-2017. La ligne horizontale noire représente la moyenne des cumuls sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles le cumul de pluie est supérieur à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles le cumul de pluie est inférieur à la moyenne.

7.2.4.2 Analyse des épisodes de pluies fortes listés par le BRGM

Les cartographies de l'ensemble des 33 épisodes pluvieux sont présentées à l'annexe A.4. Dans cette section, deux épisodes ayant générés de forts cumuls de pluies sont présentés : un épisode pluvieux en période cyclonique (Matthew) et un épisode pluvieux hors cyclone (épisode de pluie ayant provoqué les inondations de mai 2004).

La figure 7.6 présente les cumuls de pluies pendant le cyclone Matthew, qui a traversé Haïti du 4 au 6 octobre 2016. Matthew était un cyclone de catégorie 4 (H4) lors de son passage en Haïti qui a duré environ 3 jours. La presqu'île du sud a été très exposée aux fortes pluies, principalement les départements de la Grande Anse et du Sud, avec des cumuls de pluies supérieurs à 700 mm (selon MSWEP ; voir la figure 7.6). La ville des Cayes et plusieurs autres villes dans le département du Sud d'Haïti ont enregistré des cumuls de pluies supérieurs à 900 mm (selon MSWEP ; voir la figure 7.6). C'est d'ailleurs la partie Sud d'Haïti qui a été le plus affectée par les pertes en vies humaines (environ 550 morts) et en biens matériels (Marcelin *et al.*, 2016 ; Shultz *et al.*, 2016 ; Terrier *et al.*, 2014). Les départements géographiques ayant les plus forts cumuls de pluies pendant Matthew sont cohérents avec la trajectoire du cyclone et les départements réellement inondés. Ainsi, nous considérons donc que MSWEP a bien capturé les pluies associées au cyclone Matthew.

La figure 7.7 présente les cumuls de pluies associés aux inondations du 23 et 24 mai 2004. Cet épisode de pluie d'une durée d'environ 2 jours a affecté principalement le Sud-Est d'Haïti avec des cumuls de pluies supérieurs à 280 mm et ayant atteints les 380 mm dans certaines zones. Cet épisode de pluies a provoqué des inondations majeures ayant provoqué la mort de plusieurs milliers de personnes dans le département du Sud-Est d'Haïti (voir la section 1.3). Ainsi, les départements géographiques ayant les plus forts cumuls de pluies sont cohérents avec les zones réellement inondées. De ce fait, nous considérons que MSWEP a bien capturé l'épisode de pluie ayant provoqué les inondations de mai 2004.

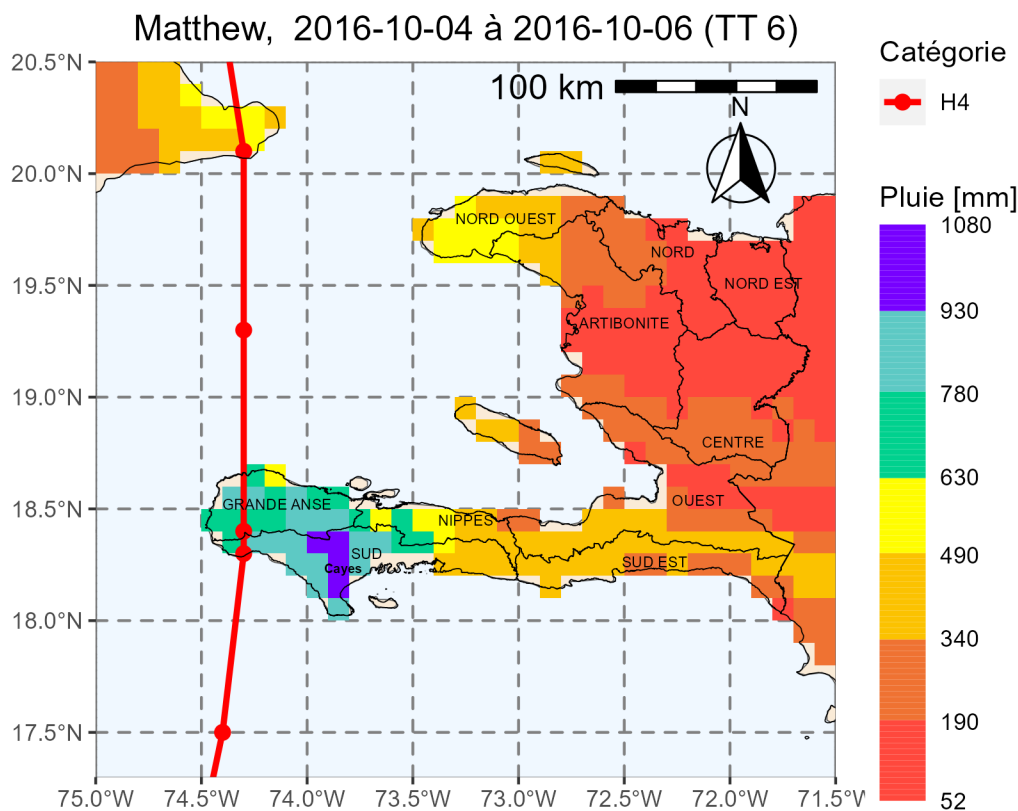


FIGURE 7.6 – Carte de cumuls de pluies MSWEP générés par le cyclone Matthew.

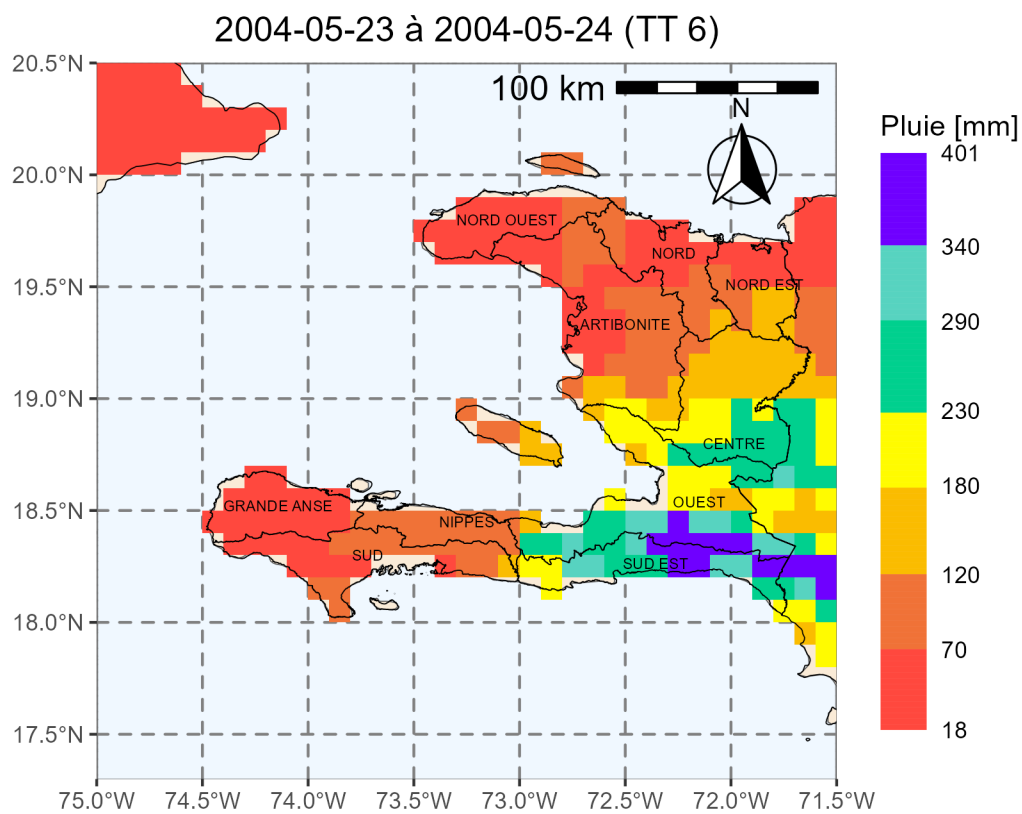


FIGURE 7.7 – Carte de cumuls de pluies MSWEP ayant causé les inondations de mai 2004.

Le graphique de gauche de la figure 7.8 résume les résultats de l'analyse qualitative de la cohérence entre les cartes de cumuls de pluies MSWEP et les zones réellement inondées pour l'ensemble des 33 épisodes pluvieux listés par le BRGM. Les résultats obtenus montrent que les cartes des cumuls de pluies MSWEP sont cohérentes avec les départements affectés pour plus de 90% des épisodes pluvieux liés aux cyclones, et près de 80% pour les épisodes pluvieux hors cyclone. MSWEP semble donc bien capturer la plupart des épisodes pluvieux ayant provoqué les inondations listées par le BRGM.

Le graphique de droite de la figure 7.8 résume les types de temps de Moron *et al.* (2016) associés aux 33 épisodes. Les résultats montrent que plus de 60% des événements cycloniques sont associés au type de temps 6, 30% aux types de temps 4 et 5, et 10% au type de temps 1. Les types de temps 4 à 6 sont très fréquents pendant la période cyclonique, qui s'étend de juin à novembre (voir la section 3.2.1.3) ; c'est ce qui explique qu'ils sont associés à plus de 90% des événements cycloniques. Les 20 épisodes pluvieux hors cyclone sont associés à 6 des 8 types de temps (1, 3, 4, 5, 6 et 8), dont plus de 50% sont associés aux types de temps 5 et 6, qui sont très fréquents entre mai-juin et août-octobre, et qui correspondent à peu près aux deux saisons de fortes pluies. Ces types de temps sont caractérisés par une réduction de l'intensité de l'anticyclone NASH (voir les sections 3.2.1.2 et 3.2.1.3).

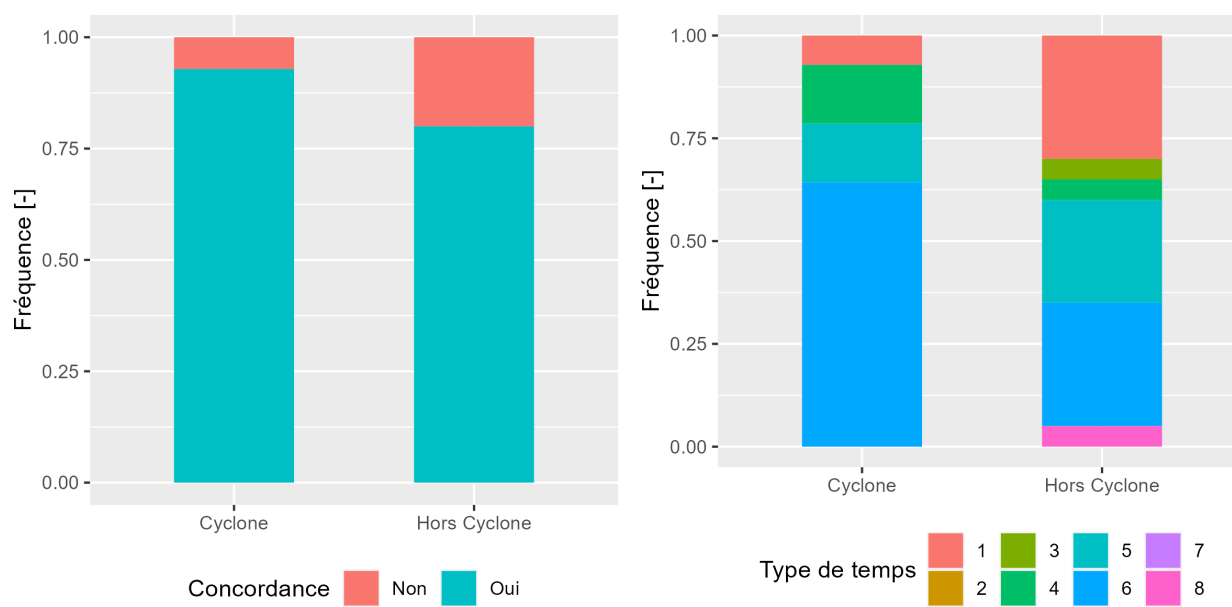


FIGURE 7.8 – Évaluation qualitative de la concordance entre les cartes de cumuls de pluies MSWEP et les trajectoires des cyclones, et les zones touchées par les inondations majeures listées par le BRGM (à gauche). Les types de temps de Moron *et al.* (2016) associés à l'ensemble des 33 épisodes pluvieux (à droite).

Les cumuls de pluies des 33 épisodes pluvieux ont été synthétisés et sont présentés à la figure 7.9 sous forme de boîtes à moustaches, où chaque boîte à moustaches représente les cumuls de pluies de l'ensemble des pixels MSWEP sur Haïti pour un épisode pluvieux. Les épisodes pluvieux en période cyclonique (partie gauche de la figure 7.9) ont affecté l'ensemble du territoire haïtien : tous les pixels ont un cumul de pluie supérieur à 50 mm. Les zones les plus impactées ont des cumuls de pluies dépassant 350 mm, et parfois 500 mm, ce qui représentent entre 25 et 35% de la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée en quelques jours. Les épisodes pluvieux hors cyclone (partie droite de la figure 7.9) sont beaucoup plus localisés spatialement, avec la plupart des pixels qui ont des cumuls de pluies nuls.

La partie gauche de la figure 7.9, qui présente les cumuls de pluies lors des cyclones et le tableau 1.1 du chapitre 1, qui présente les dégâts causés par ces cyclones, montrent qu'il n'y a pas de corrélation nette entre les cumuls de pluies et les dégâts qu'ils peuvent engendrer. La tempête tropicale Jeanne par exemple, est la plus meurtrière. Par contre, Jeanne fait partie des cyclones ayant des cumuls les moins forts (partie gauche de la figure 7.9). Ceci peu s'expliquer par le système de drainage qui était non-opérationnel dans la ville des

Gonaïves (ville la plus impactée par Jeanne) en 2004 et donc incapable d'évacuer les eaux de pluies.

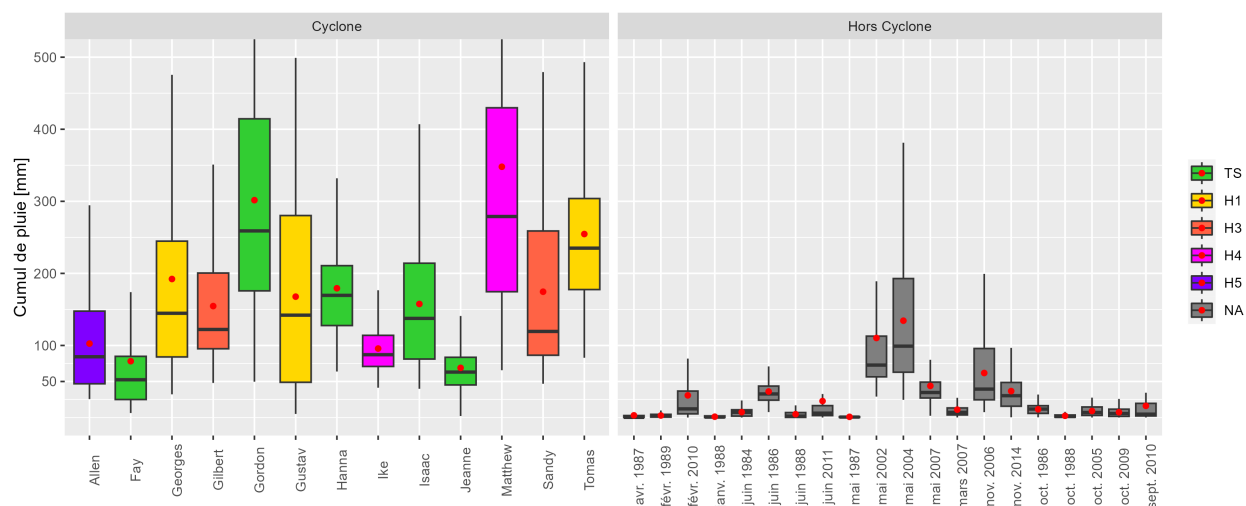


FIGURE 7.9 – Synthèse des cumuls de pluies sous forme de boîtes à moustache des 33 épisodes pluvieux sur la période 1979-2017 parmi ceux listés par le BRGM. La figure de gauche présente les 13 épisodes pluvieux associés aux cyclones. Les couleurs représentent les catégories des cyclones. La figure de droite présente les 20 épisodes pluvieux hors cyclone. Chaque boîte à moustaches représente les cumuls de pluies de l'ensemble des pixels MSWEP sur Haïti pour un épisode pluvieux.

7.2.4.3 Analyse des épisodes de fortes pluies pendant la période 1979-2017

Les résultats de la figure 7.9 montrent que la plupart des zones inondées ont reçu un cumul de pluies supérieur à 50 mm. Ainsi, le seuil de cumul de pluies de 50 mm de pluies, déjà utilisé au chapitre 5, est de nouveau retenu comme seuil à partir duquel un épisode de pluies est considéré comme fort. Ainsi, un épisode de pluie est considéré comme fort si son cumul est supérieur à 50 mm sur au moins un pixel. 1315 épisodes de fortes pluies ont été identifiés avec les données MSWEP sur la période 1979 à 2017. Les cumuls maximums de ces épisodes de fortes pluies sont localisés sur tout le territoire haïtien à l'exception de deux zones de plaines : la plaine du Cul de Sac dans le département de l'Ouest et la plaine de l'Artibonite (voir la figure 7.10). Les cumuls maximums de ces épisodes de fortes pluies sont cependant beaucoup plus fréquents dans la zone 1 (principalement dans les département géographique de la Grande Anse et du Sud) et la zone 2, et un peu moins fréquent dans la zone 3 et très peu fréquents dans la zone 4 (notamment le département de l'Artibonite). Les épisodes de fortes pluies dans la zone 1 sont, pour la plupart, observés entre mai et novembre, avec un pic en août (voir la figure 7.11). Par contre, dans la zone 2, une baisse relative des épisodes de fortes pluies est observée en juillet et août, qui est intercalé entre deux périodes où les épisodes de fortes pluies sont très fréquents. Les épisodes de fortes pluies sont relativement faibles dans les zones 3 et 4, notamment en période hivernale.

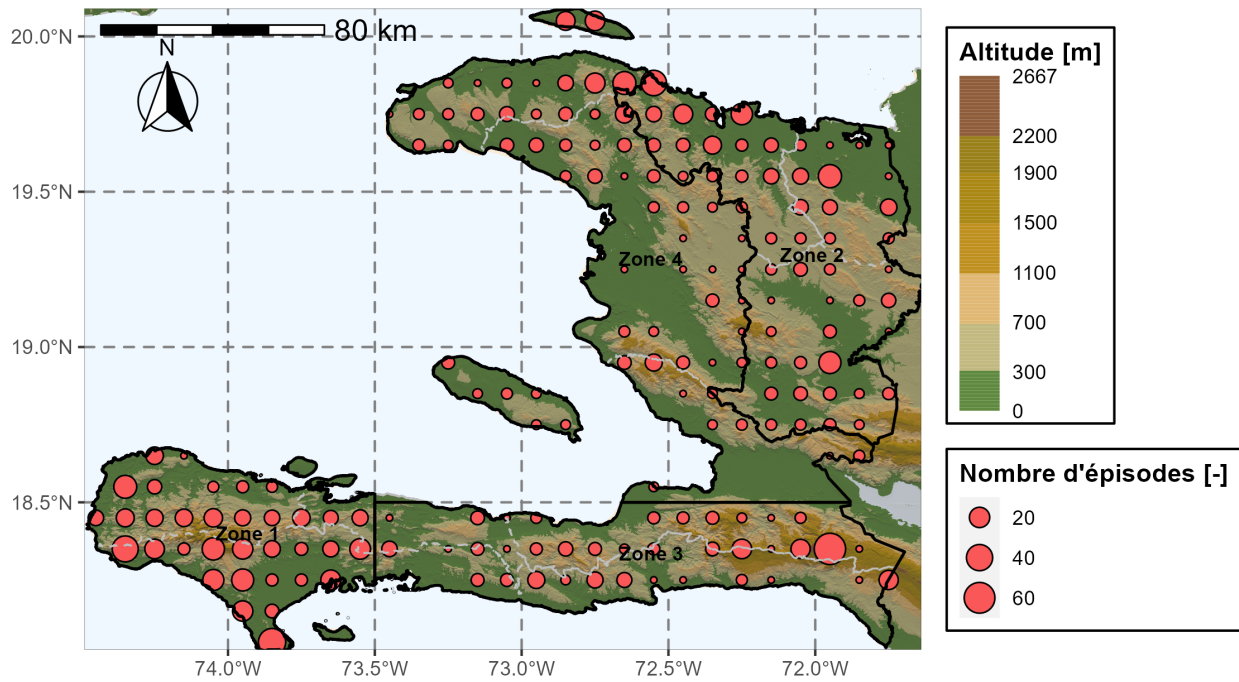


FIGURE 7.10 – Distribution spatiale des épisodes de fortes pluies en Haïti : les points représentent les pixels où les cumuls maximum sont observés pour chaque épisode. La taille des points est fonction du nombre d'épisodes identifiés sur la période 1979-2017. Les limites des quatre zones de pluies homogènes sont renseignées par des lignes noires continues. Les limites des départements géographiques sont renseignées par des lignes grises discontinues. Les données topographiques du SRTM (Reuter *et al.*, 2007) sont présentées en arrière plan.

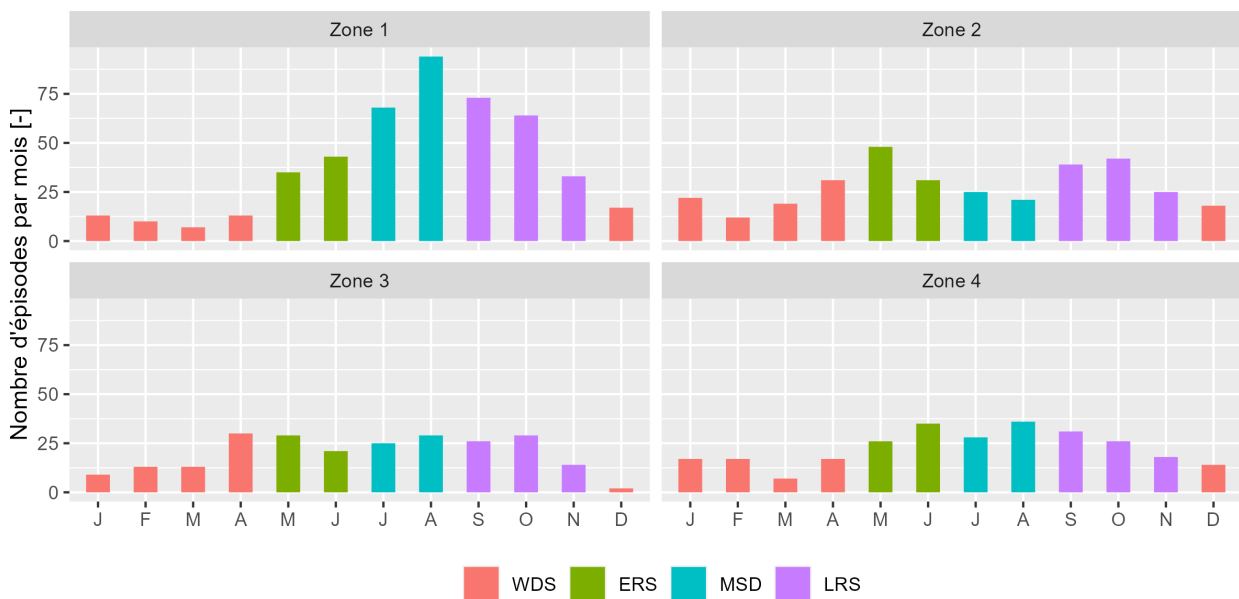


FIGURE 7.11 – Nombre d'épisodes pluvieux, sur la période 1979-2017, ayant des cumuls de pluies supérieurs à 50 mm sur au moins un pixel pour chacun des 12 mois et pour chacune des quatre zones de pluies homogènes.

La figure 7.12 présente la variabilité interannuelle des durées moyennes des épisodes de fortes pluies pour chacune des quatre zones de pluies homogènes. Les durées moyennes des épisodes de fortes pluies sont plus élevées dans les zones 1 et 2 que dans les zones 3 et 4 (voir la figure 7.12). En effet, les durées moyennes des épisodes de fortes pluies sont de 70 h environ (près de trois jours) dans la zone 1, contre 50 h (un peu plus de deux jours) dans la zone 4. Les durées des épisodes de fortes pluies des zones 2 et 3 sont entre ces deux valeurs, c'est-à-dire entre 50 h et 70 h. Les durées des fortes pluies qui sont plus élevées dans la zone 1 entraînent des cumuls de pluies nettement plus élevés dans la zone 1 par rapport aux trois autres (voir la figure 7.13). Les cumuls moyens annuels (voir la figure 7.13) ainsi que les durées (voir la figure 7.12) des épisodes de fortes pluies semblent suivre les mêmes variabilités temporelles pour les quatre zones. Aucune tendance nette des cumuls moyens annuels n'a été observée. Par contre, les durées des épisodes de pluies ont tendance à être inférieures à la moyenne (ligne horizontale noire) à partir des années 2000.



FIGURE 7.12 – Variabilité interannuelle des durées moyennes des épisodes de fortes pluies, identifiés avec les données MSWEP, pour chacune des quatre zones de pluies homogènes. La ligne horizontale noire représente la durée moyenne des épisodes de fortes pluies sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles la durée moyenne est supérieure à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles la durée moyenne est inférieure à la moyenne.

La figure 7.14 présente les fréquences des types de temps associés aux épisodes de fortes pluies. Les résultats obtenus montrent que plus de deux tiers des épisodes de fortes pluies sont associés aux types de temps 4 à 6 qui correspondent aux types de temps d'été et caractérisés par une réduction de l'intensité de l'anticyclone NASH (voir les sections 3.2.1.2 et 3.2.1.3). Moins d'un tiers des épisodes de fortes pluies est associé aux types de temps 1 à 3 et 7 et 8. Ces types de temps correspondent aux types de temps d'hiver et sont caractérisés par une intensification de l'anticyclone NASH qui provoque une saison relativement sèche en hiver (voir les sections 3.2.1.2 et 3.2.1.3).

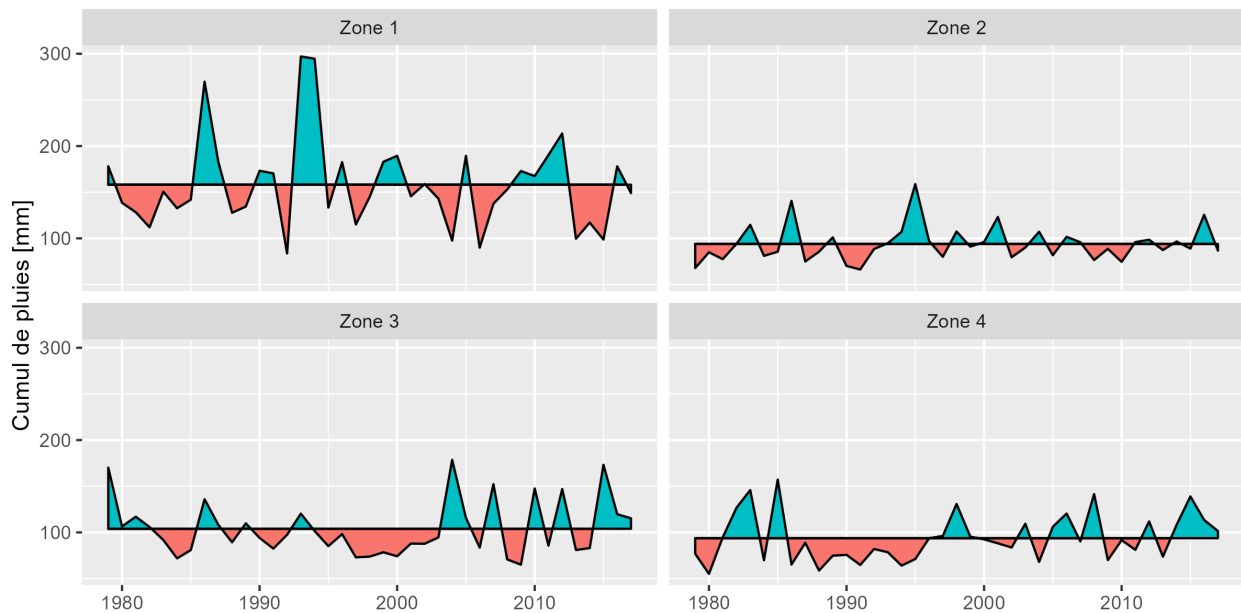


FIGURE 7.13 – Variabilité interannuelle des cumuls de pluies moyens annuels des épisodes de fortes pluies, identifiés avec les données MSWEP, pour chacune des quatre zones de pluies homogènes. La ligne horizontale noire représente la moyenne des cumuls maximum sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles le cumul maximum est supérieur à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles le cumul maximum est inférieur à la moyenne.

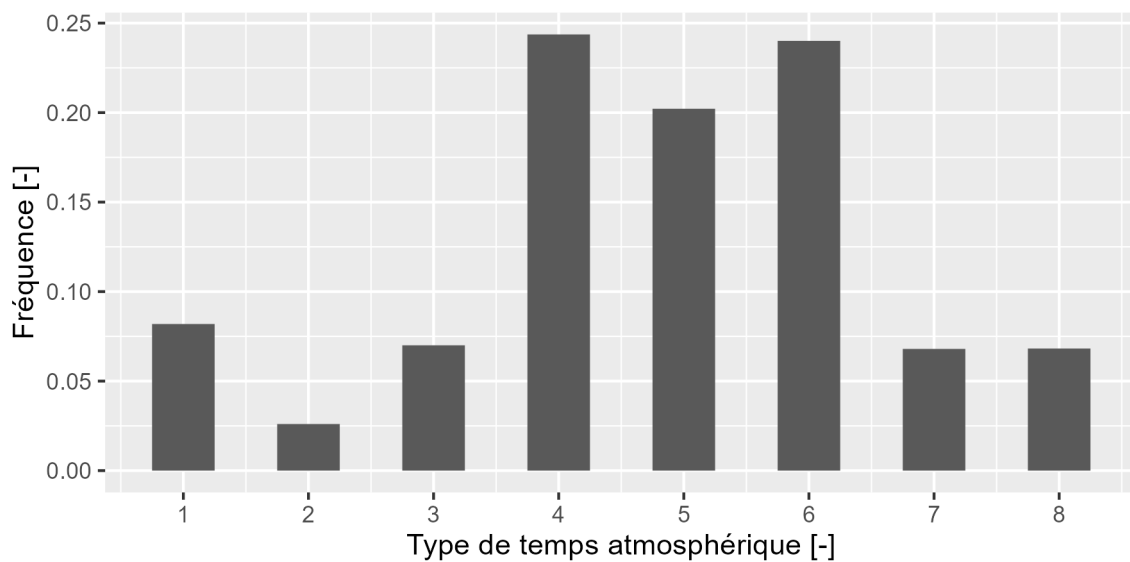


FIGURE 7.14 – Fréquence des huit types de temps de Moron *et al.* (2016) associés aux épisodes de fortes pluies.

7.3 Analyse fréquentielle de pluies et de débits de 21 bassins versants haïtiens

7.3.1 Objectifs cette partie

Cette section propose :

1. d'évaluer la capacité de MSWEP à prédéterminer les valeurs de pluies à l'échelle des Grandes Antilles,
2. de simuler des séries de débits journaliers sur la période 1979-2017 pour 21 bassins versants haïtiens à partir des données de pluies MSWEP et les paramètres du modèle hydrologique GR4J (Perrin *et al.*, 2003) obtenus à partir des données historiques (Bathelemy *et al.*, 2023a).
3. d'utiliser les séries de débits simulés et la base de données de pluies MSWEP pour prédéterminer des valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour pour 21 bassins versants à partir des lois statistiques Gumbel (Gumbel, 1958) et GEV (Beirlant *et al.*, 2004; Coles, 2001; Jenkinson, 1955) et la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967).

7.3.2 Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude sont :

1. la base de données de pluies MSWEP (Beck *et al.*, 2019). La base de données de pluies MSWEP, présentée à la section 6.5.2.3, est disponible sur la période 1979-2017 à une résolution spatiale de 0.1° (111 km à l'équateur) et une résolution temporelle de 3 h. Des cumuls journaliers ont été réalisés à partir des données au pas de temps 3h.
2. les séries de pluies journalières disponibles dans les Grandes Antilles. Ces séries de pluies ont été présentées à la section 6.5.1.
3. les paramètres du modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003) obtenus après calage sur la période historique (1920-1940) pour les 21 bassins versants haïtiens (Bathelemy *et al.*, 2023a).

La base de données MSWEP est construite à partir de données pluviométriques sur l'ensemble du globe, parmi lesquelles quelques pluviomètres dans les Grandes Antilles. Les stations proches de celles utilisées dans la construction de MSWEP ont donc été exclues dans notre échantillon de pluviomètres. La méthode utilisée pour exclure les stations proches de celles utilisées dans MSWEP est présentée à la section 6.5.1.3, les positions des stations utilisées dans MSWEP et des stations jugées indépendantes sont présentées à la figure A.2. Ainsi, 42 stations pluviométriques dans les Grandes Antilles ont été utilisées dans cette étude, dont 19 en République Dominicaine, 5 en Haïti, 2 à Cuba, 10 en Jamaïque et 6 à Porto Rico. La période de disponibilité de ces données est présentée à la figure 6.2. La plupart des stations en Jamaïque ont des données sur la période 2012-2017, et les données des autres pays sont disponibles, pour la plupart, sur la période 1980-2017 avec cependant, une dizaine de stations avec plus de 10 ans de lacunes en République Dominicaine.

7.3.3 Méthodologie

7.3.3.1 Evaluation de la capacité de MSWEP à estimer prédéterminer les pluies

Les mailles de données MSWEP correspondant aux stations pluviométriques ont été extraites. Ensuite, les ratios entre les pluies maximales annuelles obtenues avec les données des stations pluviométriques et celles obtenues avec les données MSWEP ont été calculés. Enfin, les ratios entre les valeurs de pluies pour certaines périodes de retour obtenues avec les données des stations pluviométriques et celles obtenues avec les données MSWEP ont été calculés. Les pluies ont été prédéterminées avec les lois statistiques Gumbel et GEV (voir la section 5.3.3.1).

Ces deux types de ratios permettent d'évaluer la capacité de MSWEP i) à représenter les pluies maximales annuelles et ii) à être utilisé pour prédéterminer des valeurs de pluies avec les lois Gumbel et GEV.

7.3.3.2 Prédétermination des pluies

Les séries de pluies des bassins versants ont été calculées comme une moyenne pondérée des données de pluies MSWEP. Les coefficients de pondération sont proportionnels à la surface de la maille MSWEP chevauchant le bassin versant (voir la section 4.7.2.1).

L'analyse fréquentielle des pluies est réalisée avec les séries de pluies de bassins versants et les lois statistiques Gumbel et GEV (voir la section 5.3.3.1) pour les 21 bassins versants étudiés.

7.3.3.3 Estimations des séries d'évapotranspirations potentielles (ETP)

Les séries d'ETP ont été calculées avec les données de température ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020) et la formule d'Oudin *et al.* (2005). La méthode développée par Oudin *et al.* (2005) a été retenue pour le calcul de l'ETP pour au moins deux raisons. Les autres paramètres communément utilisés pour le calcul de l'ETP (vent, humidité etc.) sont moins accessibles, ce qui justifie l'utilisation d'une formule basée uniquement sur la température dans un contexte où il y a peu de données. De plus, c'est l'une des méthodes les plus pertinentes pour la modélisation pluie-débit comparée à 27 modèles de calcul de l'évapotranspiration potentielle et testée sur plus de 300 bassins versants couvrant plusieurs zones climatiques dont les zones tropicales (Oudin *et al.*, 2005).

7.3.3.4 Simulation de séries de débits journaliers sur la période 1979-2017

Les séries de pluies à l'échelle des bassins versants, les séries d'ETP et les paramètres du modèle GR4J issus de la base de données Simbi (trois jeux de paramètres par bassin versant) ont été utilisés pour simuler trois séries de débits journaliers pour chacun des 21 bassins versants. Pour rappel, les données historiques (1920-1940) ont été divisées en deux sous-périodes ayant les mêmes quantités de données : les deux premiers jeux de paramètres ont été obtenus par calage sur les deux sous-périodes et le troisième jeu de paramètres a été obtenu par calage sur l'ensemble des données historiques (voir la section 4.7.4). Pour la simulation des débits sur la période récente, les deux premières années (1979 et 1980) ont été utilisées pour initialiser le modèle.

L'hypothèse de l'utilisation des paramètres obtenus après calage sur une période ancienne pour simuler des séries de débits sur une période plus récente est une hypothèse forte, qui sera discutée en fin de section.

7.3.3.5 Prédétermination des débits

L'analyse fréquentielle des débits est réalisée avec les trois séries de débits simulés et les lois statistiques Gumbel et GEV et la méthode du Gradex (voir la section 5.3.3.1) pour les 21 bassins versants étudiés. Comme pour la période 1920-1940, le débit décennal est retenu comme pivot à partir duquel la distribution de débit est parallèle à la distribution de pluie.

La méthode du Gradex utilise essentiellement la distribution de la pluie (Gradex de la pluie) et un pivot pour prédéterminer les débits. L'objectif de cette dernière partie est d'évaluer la sensibilité des résultats en fonction du pivot choisi. Pour cela, les valeurs des débits calculés avec la méthode du Gradex à partir des débits décennaux historiques (calculés avec les données Simbi) ont été comparées avec celles obtenues à partir des débits décennaux récents (calculés avec les débits simulés obtenus avec MSWEP).

7.3.4 Résultats et discussions

7.3.4.1 Evaluation de la capacité de MSWEP à estimer les pluies fortes

La figure 7.15 présente les ratios entre les pluies maximales annuelles calculées avec les données MSWEP et celles obtenues avec les stations pluviométriques pour cinq pays des Grandes Antilles, sous forme de boîtes à moustaches, où chaque boîte à moustaches représente l'ensemble des ratios des pluies maximales annuelles pour toutes les stations d'un pays. Pour chaque pays, il y a donc autant de points que d'années non lacunaires (les années lacunaires sont présentées à la figure 6.2). Les résultats obtenus montrent que la plupart des ratios sont dans la fourchette 0.7-1.3, à l'exception de ceux calculés sur les stations de la Jamaïque. En somme, nous pouvons dire que MSWEP donne de bons ordres de grandeur des pluies maximales annuelles à l'échelle des Grandes Antilles, ce qui peut justifier son utilisation en Haïti pour l'analyse fréquentielle des pluies, en l'absence de données de référence.

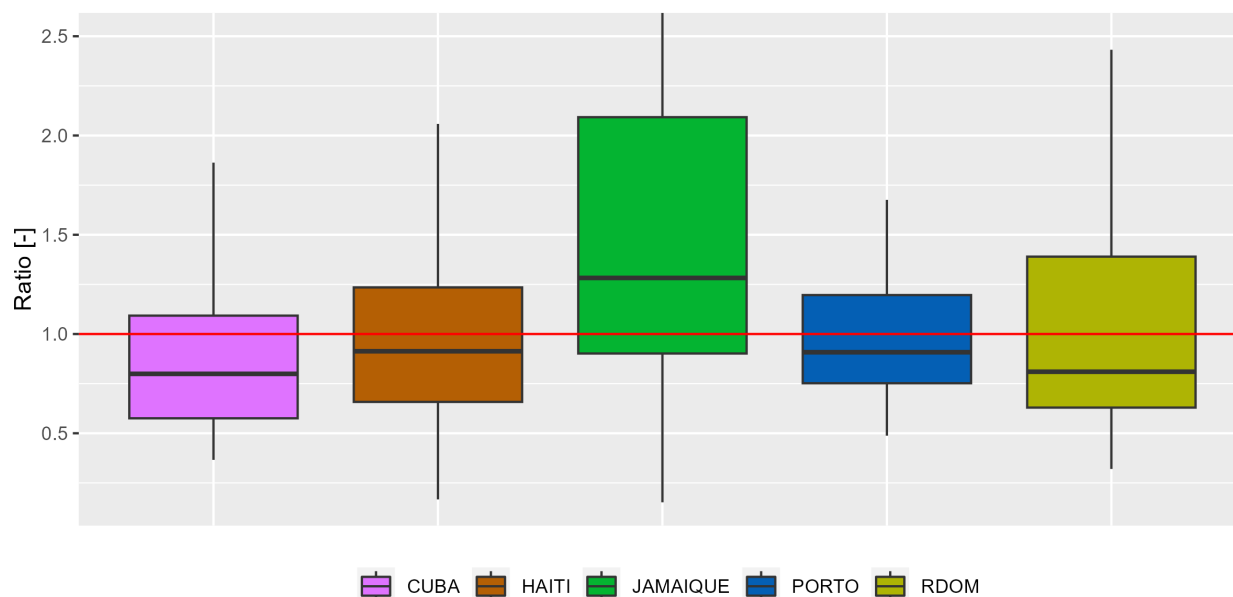


FIGURE 7.15 – Ratios entre les pluies maximales annuelles des données MSWEP (1979-2017) et celles obtenues avec les stations pluviométriques de référence pour les cinq pays des Grandes Antilles (19 stations en République Dominicaine, 5 en Haïti, 2 à Cuba, 10 en Jamaïque et 6 à Porto Rico).

La figure 7.16 présente les ratios entre les valeurs de pluies prédéterminées avec les données MSWEP et celles obtenues avec les pluviomètres de référence pour les périodes de retour de 10, 25, 50 et 100 ans. Les résultats obtenus montrent que les ratios sont plus proches de 1 pour les pluies prédéterminées avec Gumbel que ceux obtenus avec GEV. Cela provient du fait que GEV est sensible aux “outliers”, et si les pluies maximales annuelles sont différentes pendant les années les plus humides pour les deux bases de données, on aura des ajustements GEV très différents.

Les valeurs de pluies obtenus avec les deux bases de données sont très proches (ratios proches de 1) pour les données portoricaines et haïtiennes, et très différentes pour les données jamaïcaines. On peut remarquer que la qualité des résultats obtenus dépend de la longueur des séries disponibles. En effet, les séries de Porto Rico sont disponibles pour la plupart sur la période 1979-2017 (avec peu de lacunes) et celles d'Haïti sont disponibles sur la période 1980-2010 (sans lacune). Les résultats montrent que les quantiles de pluies calculés avec MSWEP sont proches de ceux des pluviomètres pour ces deux pays. A l'inverse, sur les 10 stations en Jamaïque, neuf ont des données que sur la période 2012-2017. Sur 3 de ces neuf stations, la pluie maximale annuelle dépasse 500 mm pour au moins une année. Ce même cas de figure est observé en République Dominicaine, où la moitié de stations a des données manquantes sur au moins 10 ans. Vu que ces

7.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

données sont disponibles sur une courte période, le calcul de la fréquence empirique va attribuer une faible période de retour à ces événements, ce qui n'est fort probablement pas le cas dans la réalité. C'est ce qui peut expliquer en partie la forte différence entre les quantiles MSWEP et les quantiles des stations pluviométriques en Jamaïque et à Porto Rico. En résumé, ces résultats montrent que, si on tient compte que des pluviomètres ayant des séries longues, MSWEP donne des résultats que l'on peut juger encourageants.

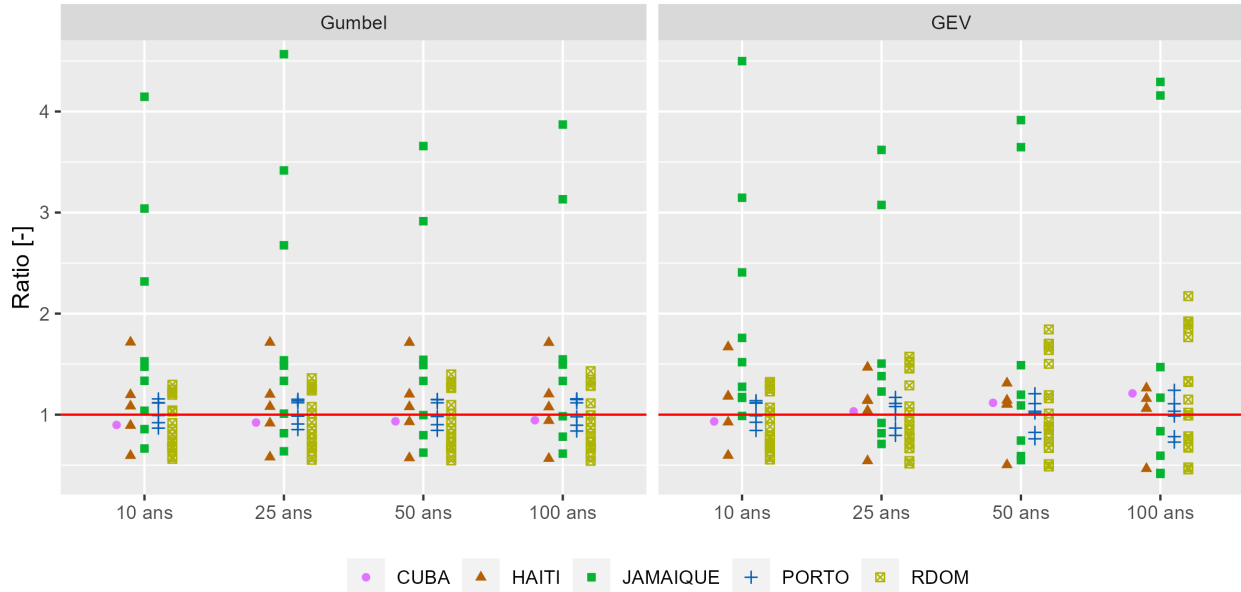


FIGURE 7.16 – Ratios entre les pluies prédéterminées avec les données MSWEP et celles obtenues avec les stations pluviométriques de référence pour plusieurs périodes de retour des cinq pays dans les Grandes Antilles (19 stations en République Dominicaine, 5 en Haïti, 1 à Cuba, 10 en Jamaïque et 6 à Porto Rico).

7.3.4.2 Prédétermination des pluies

La figure 7.17 présente, pour chaque bassin versant haïtien, les pluies maximales annuelles observées et les ajustements des lois GEV et Gumbel. Les résultats obtenus montrent que les droites de Gumbel des bassins versants dans le sud d'Haïti (Q-001, Q-07, Q-010, Q-029 et Q-068) ont des pentes beaucoup plus fortes que celles des autres bassins versants. Les ajustements avec les lois GEV et Gumbel semblent être cohérents avec la distribution empirique des pluies pour 9 des 21 bassins versants. À l'inverse, les ajustements avec la loi de Gumbel ne sont pas bons pour quatre bassins versants qui sont dans le département de l'Ouest (Q-001, Q-004, Q-007 et Q-058).

La figure 7.18 présente des plages de valeurs des pluies des 21 bassins versants étudiés. Ces plages de valeurs sont calculées avec les valeurs minimales et maximales des pluies obtenues avec les deux lois utilisées. Les résultats obtenus montrent que les plages de valeurs sont très faibles pour les faibles périodes de retour (inférieure à 10 ans) et à l'inverse, elles sont plus ou moins élevées au delà de la période de retour de 10 ans pour la plupart des bassins versants.

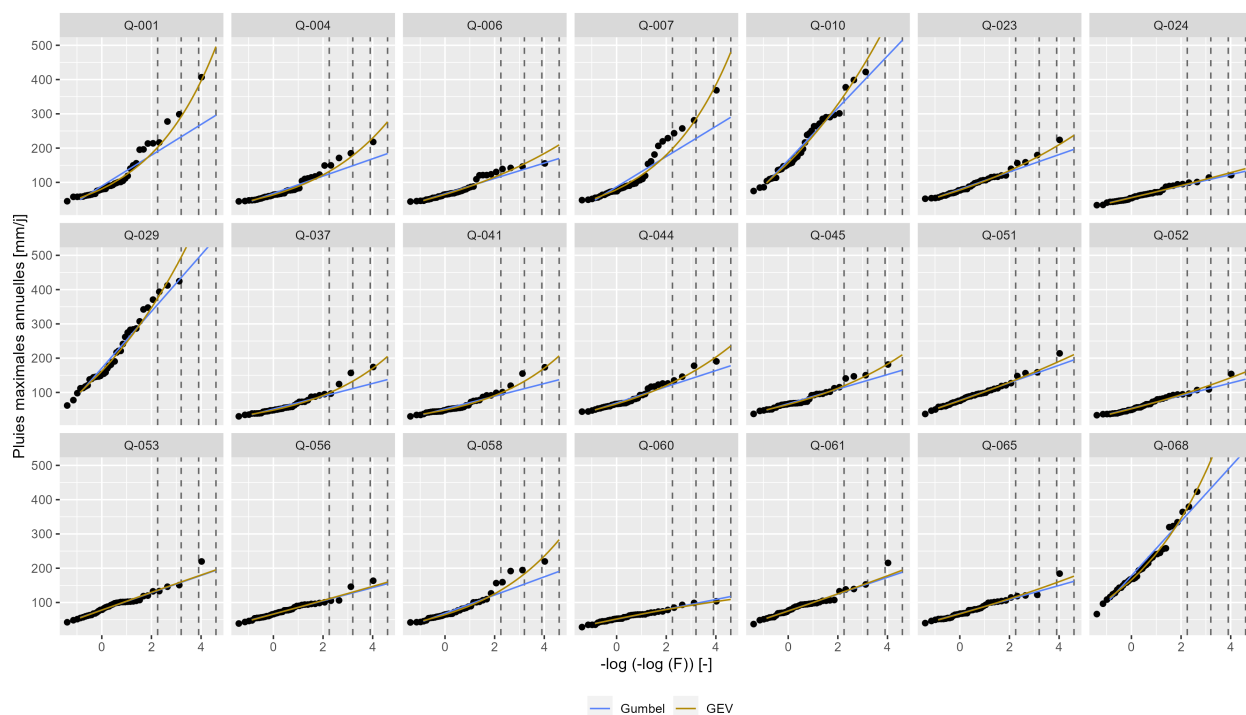


FIGURE 7.17 – Pluies maximales annuelles calculées avec les données MSWEP sur la période 1979-2017 (points noirs) et ajustement des lois statistiques Gumbel et GEV pour chacun des 21 bassins versants. Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

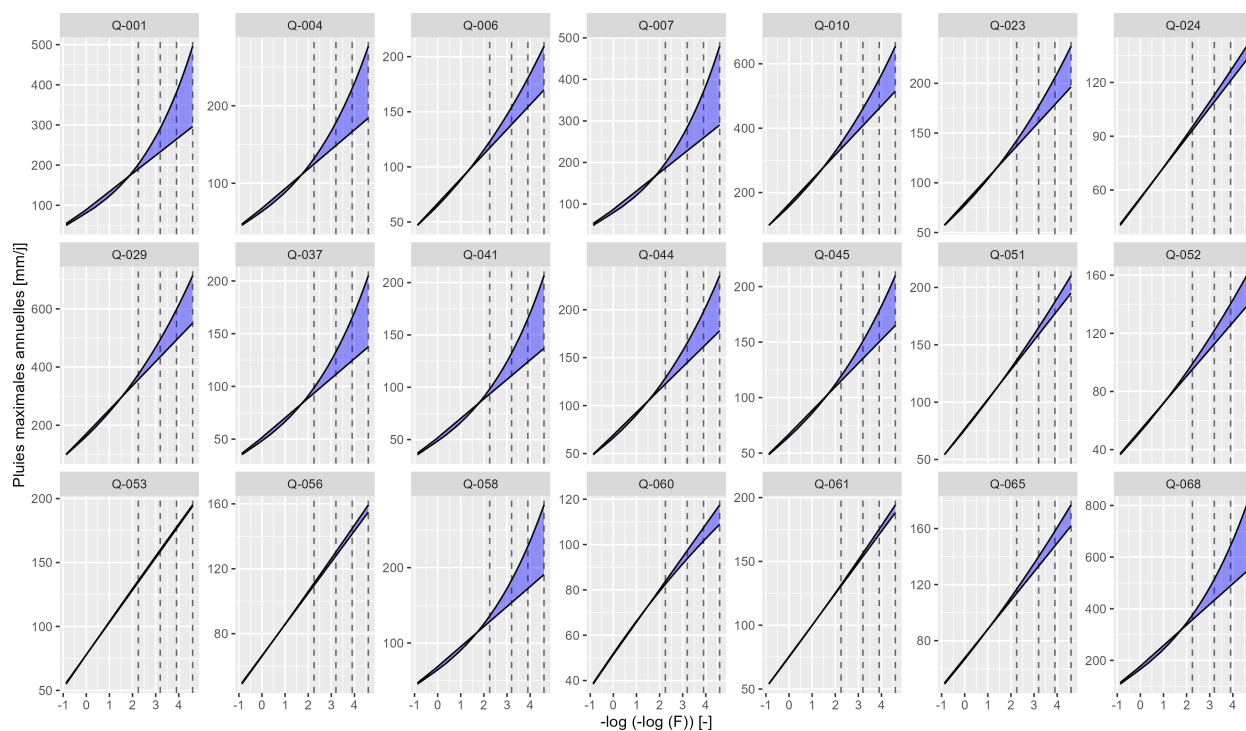


FIGURE 7.18 – Plages de valeurs des pluies prédéterminées. Ces plages de valeurs sont calculées avec les valeurs minimales et maximales des pluies obtenues avec les lois Gumbel et GEV avec les données de pluies MSWEP.

7.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

La figure 7.19 présente les cartes des pluies décennales et centennales en haut et les écarts-types en bas. Les écarts-types qui représentent la dispersion par rapport à la moyenne, ont été calculés avec les valeurs de pluies obtenues avec les lois Gumbel et GEV. Les résultats montrent que la pluie décennale est autour de 350 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour de 10 mm/j), et entre 100 et 200 mm/j ailleurs (avec un écart-type autour de 5 mm/j). La pluie centennale est autour de 600 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour de 100 et 200 mm/j), et entre 100 et 300 mm/j ailleurs (avec un écart-type autour de 50 mm/j).

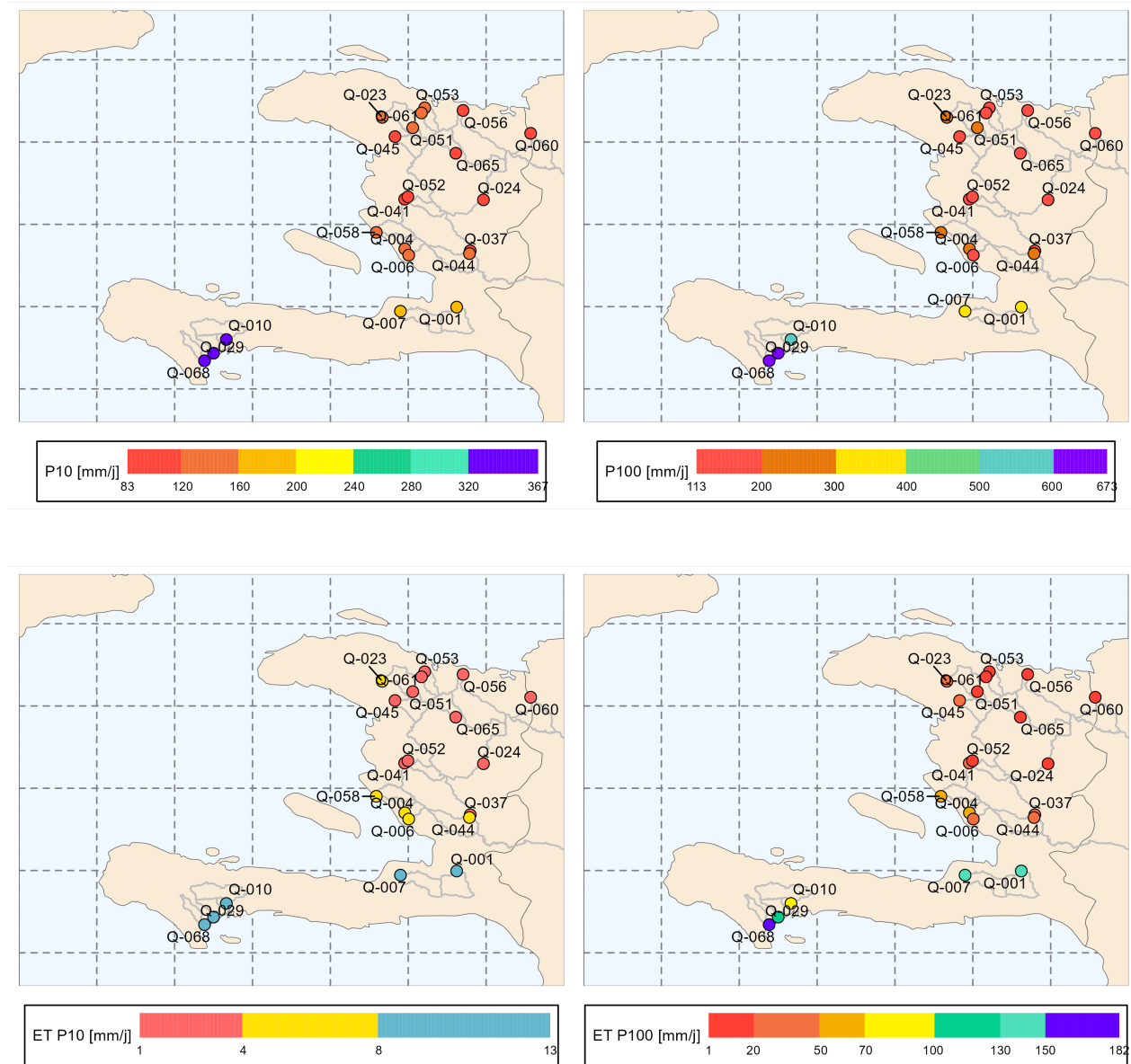


FIGURE 7.19 – En haut : cartes des pluies décennales et centennales pour les 21 bassins versants étudiés sur la période récente (1979-2017). En bas : cartes des écarts-types des pluies décennales et centennales calculés avec les valeurs des pluies obtenues avec Gumbel et GEV.

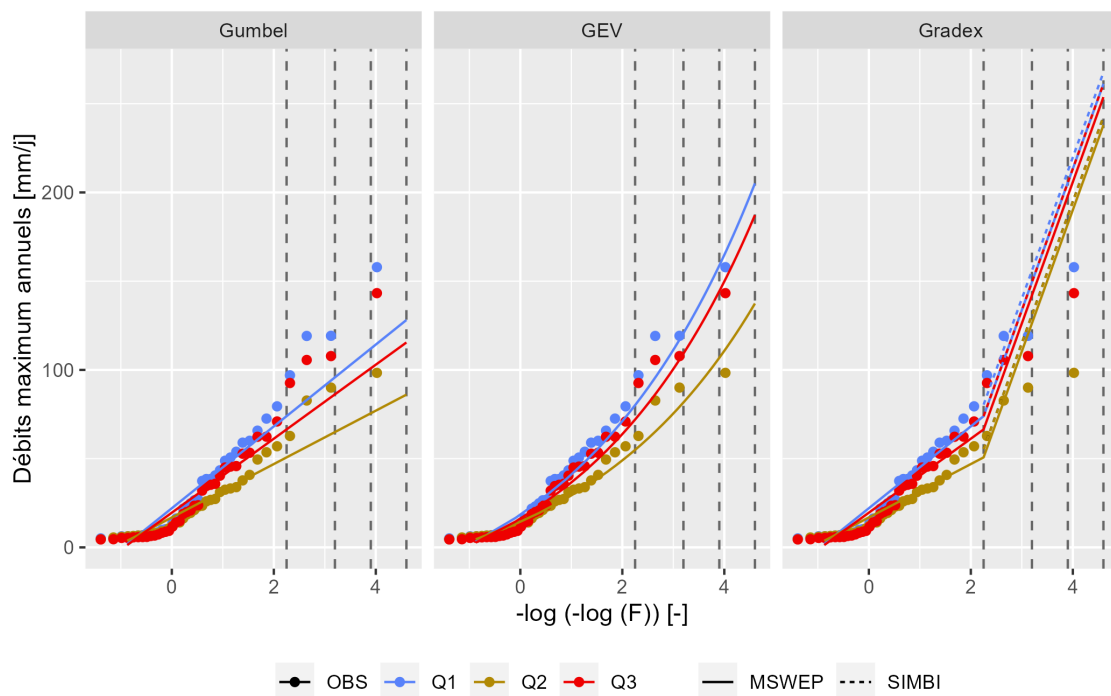
7.3.4.3 Prédétermination des débits

Les lois statistiques GEV et Gumbel et la méthode du Gradex ont été utilisées pour prédéterminer les débits des 21 bassins versants d'étude. Les résultats de seulement deux bassins versants sont présentés dans cette section à la figure 7.20, et les résultats des autres bassins versants sont présentés à l'annexe A.5. Les échantillons des maximums annuels des débits simulés sont proches pour les faibles périodes de retour (inférieures à 10 ans) pour le bassin versant Q-068 (voir la figure 5.19 (a)). De ce fait, les débits prédéterminés avec la méthode du Gradex, que ce soit avec les débits "pivots" récents (débits simulés avec MSWEP) ou des débits "pivots" historiques (débits observés et débits simulés avec les pluies de Simbi) sont proches pour toutes les périodes de retour. Par contre, pour les deux autres méthodes (GEV et Gumbel), les débits sont plus ou moins différents à partir de la période de retour 25 ans en fonction de la série de débit utilisée. En plus de l'incertitude liée aux séries de débits, une plus grande incertitude est observée en fonction de la méthode utilisée. En effet, la méthode du Gradex donne des valeurs de débits deux fois plus élevés que la loi de Gumbel pour le bassin versant Q-068.

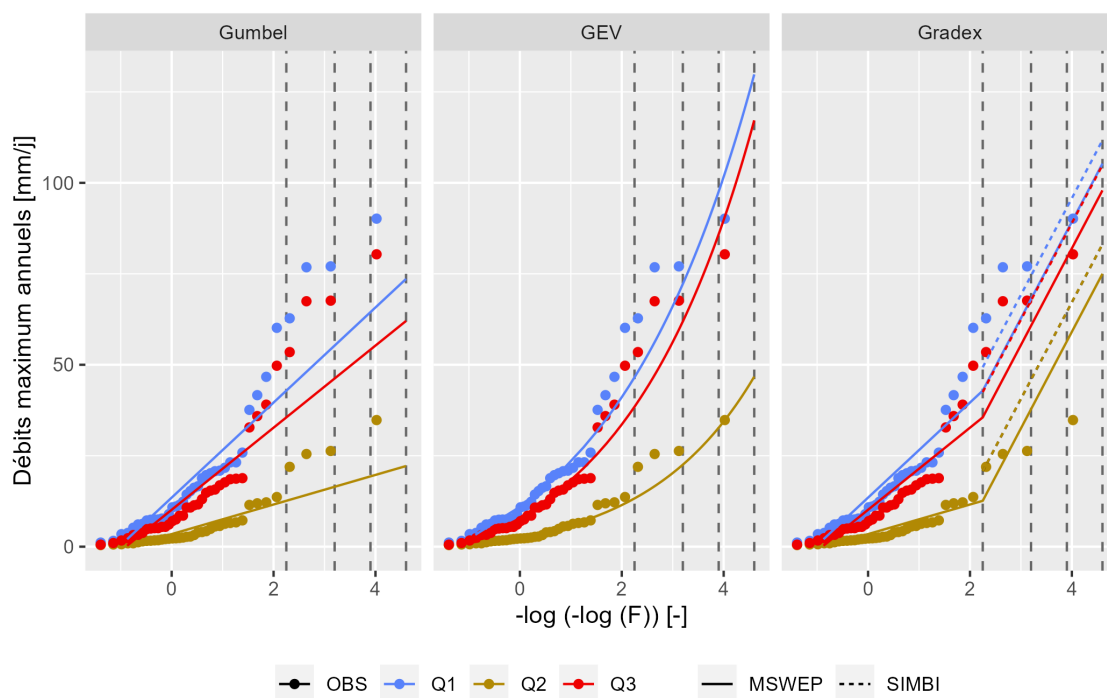
Les débits du bassin versant Q-058 présentent à peu près le même schéma que ceux du bassin versant Q-068, avec des incertitudes liées aux séries de débits et de la méthode utilisée. Mais à contrario, les incertitudes liées aux séries de débits utilisées sont beaucoup plus importantes que celles liées à la méthode utilisée. Les résultats de ces deux bassins versants sont cohérents avec ceux obtenus avec la base de données Simbi sur la période ancienne (voir la section 5.3.4.3).

La figure 7.21 présente les ordres de grandeur des débits prédéterminés avec la méthode Gradex et les séries de bassins versants MSWEP et les différentes séries de débits simulés. La couleur bleue présente les débits obtenus lorsque les débits décennaux historiques sont utilisés comme pivot et la couleur violette présente les débits obtenus lorsque les débits décennaux récents sont utilisés comme pivot pour l'ensemble des bassins versants. Les résultats obtenus montrent que la méthode du Gradex est peu sensible aux débits décennaux utilisés comme pivot pour la plupart des bassins versants. En effet, les gammes de valeurs des débits obtenus avec la méthode du Gradex sont proches, dans l'ensemble, pour la plupart des bassins versants étudiés, sauf pour le bassin versant Q-053, où l'on observe des différences significatives. Ce bassin Q-053, déjà discuté à la section 5.3.4.4, présente un pic de débit (observé) en novembre 1927 largement plus important que les autres crues annuelles. Ce pic de débit influence donc le débit décennal obtenu avec Simbi.

7.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS



(a) Q-068



(b) Q-058

FIGURE 7.20 – Débits maximum annuels (points) et ajustement des lois statistiques Gumbel, GEV et Gradex pour le bassin versant Q-068 en haut et le bassin versant Q-058 en bas. Les lignes discontinues verticales représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

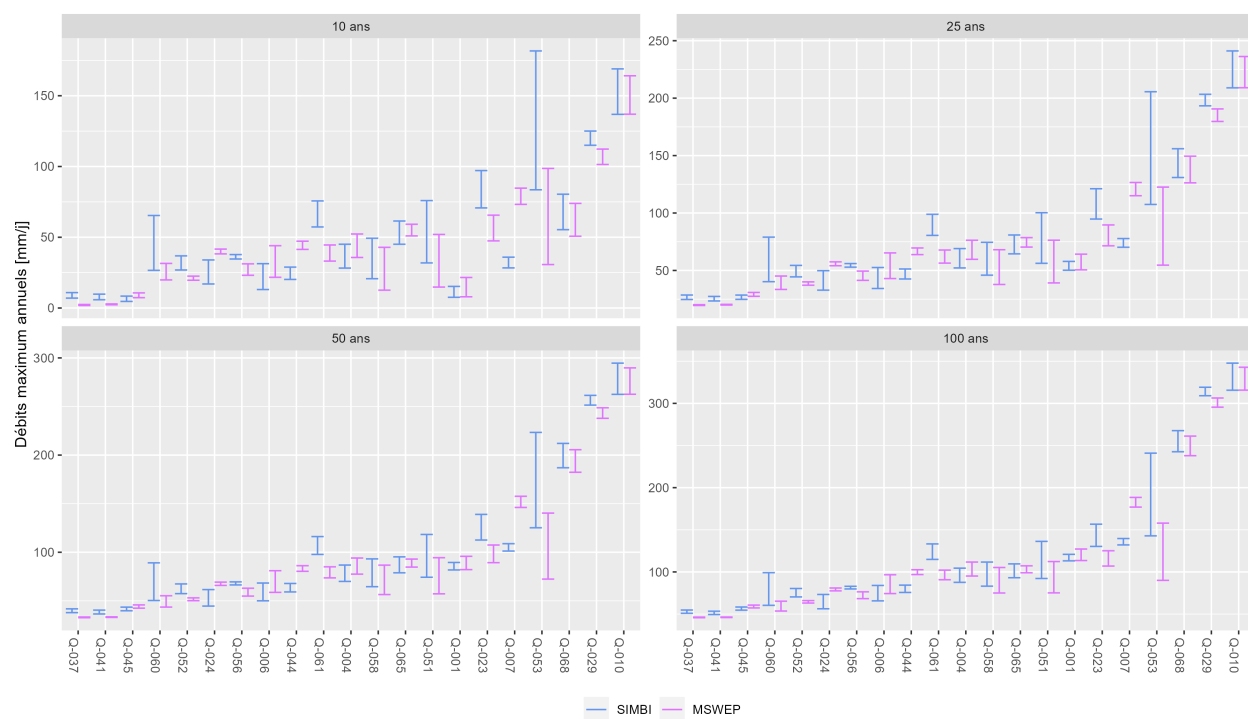


FIGURE 7.21 – Plages des valeurs de débits obtenues avec la méthode du Gradex et les séries de pluies MSWEP. Les limites inférieures et supérieures des barres verticales représentent les quantiles minimum et maximum obtenus avec les trois séries de débits simulés. En bleu, lorsque les débits décennaux historiques (calculés avec les débits simulés et observés de Simbi) sont utilisées comme pivot. En rouge, lorsque les débits décennaux récents (calculés avec les débits simulés avec les pluies MSWEP) sont utilisées comme pivot.

7.3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE PLUIES ET DE DÉBITS DE 21 BASSINS VERSANTS HAÏTIENS

La figure 7.22 présente les cartes des débits décennaux et centennaux en haut et les écarts-types en bas. Les écarts-types qui représentent la dispersion par rapport à la moyenne, ont été calculés avec les valeurs de débits obtenues avec l'ensemble des débits simulés et les lois Gumbel, GEV et la méthode du Gradex. Les résultats montrent que le débit décennal est entre 60 et 150 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour de 10 mm/j), et entre 10 et 80 mm/j ailleurs (avec un écart-type entre 5 et 15 mm/j). Le débit centennal est entre 200 et 300 mm/j dans le sud-ouest (avec un écart-type autour de 55 mm/j), et entre 30 et 120 mm/j ailleurs (avec un écart-type entre 15 et 30 mm/j).

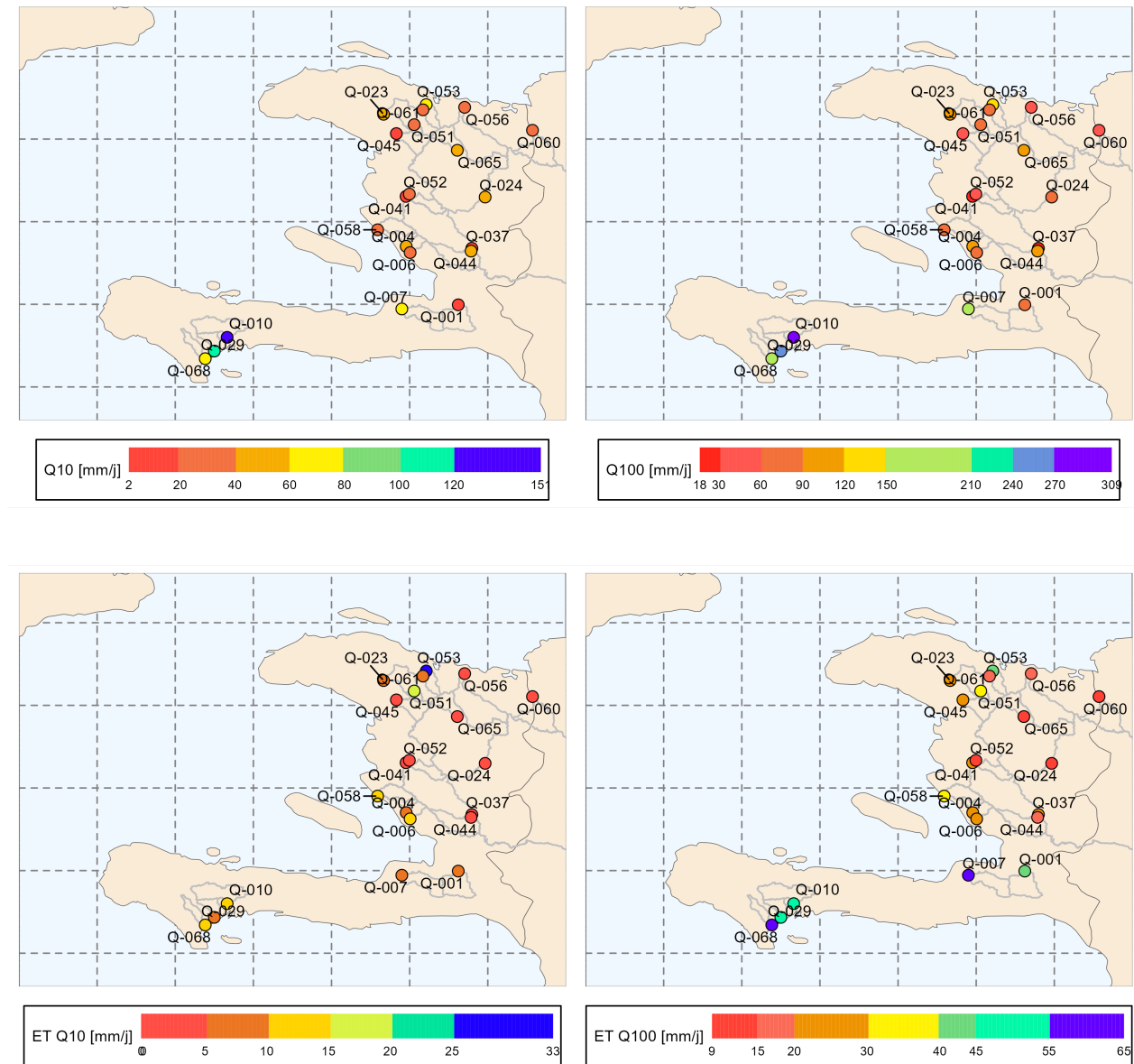


FIGURE 7.22 – En haut : cartes des débits décennaux et centennaux pour les 21 bassins versants étudiés sur la période récente (1979-2017). En bas : cartes des écarts-types des débits décennaux et centennaux calculés avec l'ensemble des débits simulés et les méthodes Gumbel, GEV et Gradex.

7.4 Conclusion du chapitre

La première partie de ce chapitre a permis de faire une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie en Haïti sur la période 1979-2017 à l'aide de la base de données de pluies MSWEP (Beck *et al.*, 2019). Dans un premier temps, les régimes et les variabilités interannuelles des pluies ont été étudiés. Puis, le nombre, les cumuls, les durées et les types de temps atmosphériques associés aux épisodes de fortes pluies ont été caractérisés. L'analyse des pluies en Haïti avec les données de pluies MSWEP a mis en évidence la forte variabilité spatiale de la pluviométrie telle que décrite par Moron *et al.* (2015). Cette forte variabilité de la pluie a permis de diviser Haïti en quatre zones de pluies homogènes. Le sud-ouest d'Haïti est la zone la plus humide (zone 1) avec une pluviométrie moyenne annuelle autour de 1900 mm/an, et la façade ouest d'Haïti, excepté le sud-ouest, est la zone la plus sèche (zone 4), avec une pluviométrie autour de 1100 mm/an. Les résultats ont aussi montré que les quatre saisons de pluies caribéennes (WDS, ERS, MSD et LRS) ont été observées dans les régimes de pluies de chacune des quatre zones de pluies homogènes. Les trois premières zones ont un régime de pluie bimodal, avec des pics de pluie et de débits pendant l'ERS et la LRS. La zone 4, formée par la façade ouest d'Haïti (excepté le sud-ouest) a un régime de pluies unimodal, avec une longue période de pluie de mai à novembre mais moins intense par rapport aux trois autres zones. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour la période 1920-1940, présentés au chapitre 5, et ceux obtenus par Moron *et al.* (2015). Enfin, les résultats ont aussi permis d'identifier une période sèche entre les années 1980-2000 et une période humide à partir de 2000. Cette alternance de période sèche et humide est cohérente avec les périodes sèches identifiées vers les années 1980 et 1990 par Taylor *et al.* (2002) et la période humide vers les années 2000 identifiée à l'échelle régionale.

La base de données de pluies MSWEP a été utilisée pour caractériser les cumuls des 33 épisodes de pluies ayant provoqués les inondations identifiées par Terrier *et al.* (2017). La cohérence spatiale entre les régions où les cumuls MSWEP ont été les plus élevés et les régions réellement inondées a été analysé. Les résultats ont montré que les cartes des cumuls de pluies MSWEP sont cohérents avec les départements affectés pour plus de 85% des épisodes de pluies. Les cumuls des pluies lors de ces épisodes de pluies sont entre 50 et 400 mm. MSWEP semble donc bien capturer la plupart des épisodes pluvieux listés par Terrier *et al.* (2017) et a donc été utilisé pour caractériser l'ensemble des épisodes de fortes pluies sur la période 1979-2017. Plus de 1300 épisodes de fortes pluies (épisodes de pluies dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm) ont été identifiés de manière automatique pendant la période 1979-2017 en Haïti. Ces épisodes de fortes pluies sont plus fréquents dans le sud-ouest d'Haïti et le nord d'Haïti. Ces épisodes ont été associés aux types de temps atmosphériques 4 à 6 (types de temps définis par Moron *et al.* (2016)), qui correspondent à une diminution de l'intensité de l'anticyclone NASH.

La capacité de MSWEP à estimer les quantiles de fortes pluies a été évaluée en comparant d'une part les pluies maximales annuelles des mailles MSWEP aux données de pluies de référence à l'échelle des Grandes Antilles et d'autre part, en comparant les quantiles de pluies obtenus avec les données MSWEP et les données de pluies de référence, toujours à l'échelle des Grandes Antilles. Les résultats obtenus ont montré que MSWEP donne de bons ordres de grandeurs des pluies prédéterminées à l'échelle des Antilles, et peut être utilisé comme données de pluies alternatives de référence pour la prédétermination des pluies en Haïti. De plus, des séries de débits journaliers ont été simulées sur la période 1979-2017 à partir des données de pluies MSWEP, des paramètres obtenus après calage sur la période historique (1920-1940) et le modèle pluie-débit GR4J (Perrin *et al.*, 2003). Enfin, ces données de pluies (MSWEP) et de débits (simulés) ont été utilisées pour prédéterminer des valeurs de pluies et de débits pour plusieurs périodes de retour à partir des lois statistiques Gumbel et GEV et la méthode du Gradex. Comme discuté à la section 5.4, des plages de valeurs de pluies et de débits ont été fournies pour chaque bassin versant.

L'ensemble des études présentées dans ce chapitre n'ont pas été réalisées à partir des données observées in situ en raison du manque de données hydrométéorologiques en Haïti sur cette époque récente. En effet, la base de données de pluies MSWEP a été utilisée pour l'analyse des pluies en Haïti sur la période 1979-2017. Bien que MSWEP soit la base de données la plus performante dans la région des Antilles, les scores KGE obtenus dans la région des Antilles sont inférieurs à ceux obtenus pour les autres régions étudiées dans le monde (Bathelemy *et al.*, 2022), ce qui met en évidence la forte incertitude associée aux données MSWEP dans la région des Antilles. De plus, les séries de débits utilisées sur la période 1979-2017 ont été obtenues à partir des données de pluies MSWEP et des paramètres du modèle pluie-débit GR4J (Perrin *et al.*, 2003)

calés sur la période 1920-1940. Or, la déforestation massive (Hedges *et al.*, 2018; Tarter *et al.*, 2018; White & Runge, 1994) et l'urbanisation anarchique (Maurice, 2014) en Haïti ces dernières décennies pourraient modifier les comportements hydrologiques des bassins versants entre la période historique et la période récente. Malheureusement, aucune étude n'a été réalisée sur l'impact de la déforestation sur la réaction des bassins versants haïtiens bien que généralement, celle-ci peut augmenter les débits de pointe et les risques d'inondations pendant la saison des pluies (Bruijnzeel, 2004; Marhaento *et al.*, 2017; Sahin & Hall, 1996; Ren *et al.*, 2020). Ainsi, l'utilisation des pluies satellitaires et des débits simulés avec des paramètres calibrés sur la période historique est une hypothèse forte. De ce fait, les données de pluies et de débits utilisées dans ce chapitre peuvent ne pas être représentatives des données des pluies et de débits réelles.

Chapitre 8

Synthèse de l'hydrologie haïtienne

8.1 Objectifs de ce chapitre

Dans les chapitres précédents, l'hydrologie d'Haïti a été étudiée sur deux périodes différentes : la période 1920-1940, qualifiée de période "historique" et la période 1979-2017, qualifiée de période "récente". Les régimes interannuels des pluies et des débits, les variabilités des pluies et des débits, les épisodes de fortes pluies et les débits maximum associés ont été étudiés, et une analyse fréquentielle des pluies et des débits a été réalisée pour chacune des périodes étudiées. Cependant, des études antérieures ont montré que la région des Antilles, Haïti compris, suit des alternances de périodes sèches et humides (Hastenrath & Polzin, 2013 ; Jury, 2009a ; Moron *et al.*, 2015). De plus, des bases de données différentes ont été utilisées pour chacune des périodes étudiées. En effet, des données observées au sol (pluviomètres et stations de jaugeages) ont été utilisées pour la période historique et des données de pluies maillées construites à partir de peu de données au sol ont été utilisées pour la période récente. De ce fait, les résultats obtenus sur les deux périodes étudiées peuvent être différents et cette différence peut être liée soit à la climatologie (si les périodes étudiées ont été plutôt sèches ou plutôt humides) et/ou aux bases de données utilisées.

Ainsi, la première partie de ce chapitre consiste à comparer les résultats obtenus sur les deux périodes étudiées dans le but de faire une synthèse de l'hydrologie en Haïti. Ensuite, la variabilité interannuelle de la pluviométrie en Haïti au cours du XX^e siècle a été analysée afin d'avoir une vision plus globale de l'évolution de la pluviométrie sur une période plus longue, et d'identifier si les deux périodes étudiées ont été des périodes plutôt sèche ou humide. Enfin, les résultats obtenus en Haïti ont été comparés avec ceux des pays des Grandes Antilles dans le but d'étudier la cohérence des résultats obtenus en Haïti à l'échelle régionale. Cette partie se concentre principalement sur les pays des Grandes Antilles ayant des données de débits disponibles (Haïti, Jamaïque et Porto Rico) car l'analyse des pluies à l'échelle régionale a déjà été réalisée dans le chapitre 6. Des données de débits continus sont disponibles uniquement en Jamaïque et à Porto Rico. De ce fait, les résultats obtenus en Haïti ont été comparés avec ceux obtenus en Jamaïque et à Porto Rico.

8.2 Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude sont des données de pluies (pluies observées in situ, pluies satellitaires et réanalyse), des données de débits (débits observés et simulés) des données de températures de l'air (réanalyse) et un modèle numérique de terrain pour plusieurs pays des Grandes Antilles.

8.2.1 Données de pluies

Les données de pluies utilisées dans cette étude proviennent de deux sources : des données de pluies observées au sol et des données de pluies maillées.

8.2.1.1 Données de pluies observées

Les données de pluies observées utilisées dans cette étude sont :

- les séries de pluies journalières de la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a) pour 21 bassins versants haïtiens et disponibles sur la période 1920-1940 (voir la section 2.2.1.1),
- la base de données construite par Moron *et al.* (2015) et constituée par 156 séries de pluies mensuelles en Haïti sur la période 1905-2005,
- 24 séries de pluies journalières à Porto Rico en provenance de la NOAA¹ (National Oceanic and Atmospheric Administration) et disponibles sur la période 1980-2020. Ces données ont été présentées à la section 2.2.1.2.

Les données de pluies observées en Jamaïque sont trop fragmentaires et la plupart des stations ont des données seulement à partir de 2012 (voir la figure 6.2). Ainsi, ces données n'ont pas été utilisées dans cette étude.

8.2.1.2 Données de pluies maillées

Les données de pluies maillées utilisées dans cette étude sont :

- la base données de pluies maillées MSWEP. Les données de pluies MSWEP sont disponibles sur la période 1979-2017, à une résolution spatiale de 0.1° et à une résolution temporelle de 3 h. Cette base de données de pluies a été présentée à la section 6.5.2.3.
- La troisième version de la réanalyse 20CR (Twentieth Century Reanalysis; Slivinski *et al.* (2019)) de la NOAA a été utilisée. Les données de pluies 20CR sont disponibles sur la période 1836-2015, au pas de temps journalier, et à une résolution spatiale de 1° (111 km à l'équateur). Cette base de données a été présentée à la section 4.6.2.3.

8.2.2 Données de débits

Les données de débits utilisées dans cette études sont :

- les séries de débits journaliers de 21 bassins versants haïtiens de la base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a), et disponibles de 1920 à 1940. Quatre séries de débits existent par bassin versant, dont une série de débit observé et trois séries de débits simulés obtenues par calage sur trois périodes différentes.
- 20 séries de débits journaliers sur Porto-Rico en provenance de la GRDC² (Global Data Runoff Center) et disponibles sur la période 1960-2020. Ces données ont été présentées à la section 2.4.2.
- les 20 séries de débits journaliers sélectionnées parmi les 84 séries disponibles (voir la section 2.4.2) sur la Jamaïque. Ces données ont été récupérées sur le site internet du service hydrologique de la Jamaïque WRA³ (Water Resources Authority) et disponibles sur la période 1970-2020 pour la plupart des stations.

Les contours des bassins versants drainés ont été présentés à la section 2.4.3.

8.2.3 Données de températures de l'air

Les données de températures de l'air utilisées dans cette étude sont les données de la réanalyse ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020). Ces données sont disponibles à partir de 1980 au pas de temps horaire, et à une résolution spatiale de 0.25°. Ces données ont été présentées à la section 6.5.2.4.

1. <https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/>, consulté le 15 octobre 2023.

2. https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html, consulté le 15 octobre 2023.

3. <http://webmapjam.dyndns.pro/webmap/app/db/index.php>, consulté le 15 octobre 2023.

8.2.4 Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT utilisé dans cette étude est la base de données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de l'USGS (United States Geological Survey) et de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), et disponible à une résolution spatiale de 90 m (Reuter *et al.*, 2007).

8.3 Méthodologie

8.3.1 Comparaison de l'hydrologie haïtienne sur les deux périodes étudiées

Cette partie présente la méthodologie utilisée permettant de comparer l'hydrologie haïtienne sur les deux périodes étudiées. Les séries de pluies de bassins versants et les séries de débits pour la période historique sont disponibles via la base de données Simbi. Les séries de pluies de bassins versants et les séries de débits pour la période récente sont celles utilisées au chapitre 7 et les méthodes de calcul sont présentées aux sections 7.3.3.2 et 7.3.3.4. Pour rappel, les séries de pluies à l'échelle des bassins versants ont été calculées comme étant une moyenne pondérée des mailles MSWEP. Les séries de débits ont été obtenues par simulation à partir du modèle pluie-débit journalier GR4J (Perrin *et al.*, 2003), des séries de pluies à l'échelle des bassins versants, des séries d'ETP calculées avec la formule d'Oudin *et al.* (2005) et le jeu de paramètres P3 du modèle GR4J obtenu après calage sur toute la période historique (1920-1940).

Les valeurs des pluies et des débits moyens telles que les régimes et les moyennes annuelles obtenus sur les deux périodes étudiées ont été comparées entre elles pour les 21 bassins versants étudiés. Ensuite, les indices climatiques de pluies présentés au tableau 8.1 et les principales caractéristiques (nombres, cumuls et durées) des épisodes de fortes pluies (épisodes de pluies dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm, voir les sections 5.2.3.5 et 7.2.3.3) obtenues sur les deux périodes ont été comparées entre eux. Enfin, les valeurs de pluies et débits prédéterminés sur les deux périodes avec les méthodes Gumbel, GEV et Gradex (voir les sections 5.3.3 et 7.3.3) ont été comparés entre elles.

8.3.2 Analyse de la climatologie haïtienne pendant le XX^e siècle

Deux facteurs pourraient expliquer une potentielle différence entre les indicateurs calculés sur des mêmes bassins versants entre deux périodes différentes :

1. La climatologie de la période étudiée. En effet, on a vu à la section 3.2.1.1 que la région des Caraïbes est soumise à des alternances de périodes sèches et humides. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être significativement différents si l'une des périodes étudiées est sèche et l'autre humide.
2. La base de données utilisée. En effet, des données observées ont été utilisées pour la période historique (1920-1940) et des données de pluies satellitaires ont été utilisées pour la période récente (1979-2017).

Pour cela, la variabilité interannuelle de la pluviométrie en Haïti au cours du XX^e siècle a été analysée à partir de la base de données de pluies mensuelles construite par Moron *et al.* (2015), afin d'avoir une vision plus globale de l'évolution de la pluviométrie sur une période plus longue, et d'identifier si les deux périodes étudiées ont été des périodes plutôt sèche ou humide. Néanmoins, la base de données de Moron *et al.* (2015), et sera appelée "données MORON" dans la suite, est lacunaire et la plupart des stations n'ont pas de données disponibles sur tout le XX^e siècle (voir la section 2.2.1.1). La rupture liée à la disponibilité des stations peut induire une non-stationnarité, et peut impacter les résultats de la variabilité interannuelle de la pluviométrie en Haïti. De ce fait, la réanalyse NOAA 20CR continue de 1836 à 2015, a également été utilisée comme données de pluies complémentaires pour étudier la variabilité interannuelle de la pluviométrie.

De plus, les données MSWEP ont aussi comparées été aux données MORON sur la période 1979-2000 (période commune où les données sont disponibles pour les deux bases de données) dans le but de voir si ces deux bases de données sont cohérente, et si MSWEP représente bien la pluviométrie en Haïti.

TABLEAU 8.1 – Définition des indices climatiques de pluies. Tableau tiré des travaux de Stephenson *et al.* (2014).

Indice	Description	Définition	Unité
CDD	jours secs consécutifs	nombre maximal de jours secs consécutifs	j
CWD	jours de pluies consécutifs	nombre maximal de jours humides consécutifs	j
R10mm	jours supérieurs à 10 mm de pluies	nombre annuel de jours où le la pluie est > 10 mm	j
R20mm	jours supérieurs à 20 mm de pluies	nombre annuel de jours où le la pluie est > 20 mm	j
R50mm	jours supérieurs à 50 mm de pluies	nombre annuel de jours où le la pluie est > 50 mm	j
RX1day	pluie maximale sur 1 jour	pluie journalière la plus élevées	mm
SDII	indice d'intensité journalière simple	pluies annuelles divisées par le nombre de jours humides	mm/j

8.3.3 Cohérence entre l'hydrologie haïtienne et l'hydrologie à l'échelle des Grandes Antilles

Les résultats obtenus pour les 21 bassins versants haïtiens ont été comparés à ceux obtenus pour les bassins versants de deux pays des Grandes Antilles pour lesquels les données sont disponibles : 20 bassins versants en Jamaïque et 20 bassins versants à Porto Rico. Puisque les données de ces deux pays (Jamaïque et Porto Rico) ne sont pas disponibles sur la période historique, la comparaison a été réalisée uniquement sur la période récente. Les analyses des pluies ont été réalisées avec les données MSWEP pour les trois pays (Haïti, Porto Rico et Jamaïque) et aussi les données des pluviomètres de référence à Porto Rico. Les analyses des débits ont été réalisées avec les séries de débits observés en Jamaïque et à Porto Rico, et des séries de débits simulés en Haïti.

Les séries de pluies de bassin versant obtenues avec les données de pluies MSWEP ont été calculées comme étant une moyenne pondérée des données de pluies MSWEP. Les coefficients de pondération sont proportionnels à la surface de la maille MSWEP chevauchant le bassin versant. Les séries de pluies de bassin versant obtenues avec les pluviomètres de référence ont été calculées comme étant une moyenne pondérée des pluviomètres. Les coefficients de pondération ont été calculés grâce aux polygones de Thiessen (Croley & Hartmann, 1985 ; Han & Bray, 2006).

Premièrement, les valeurs moyennes des pluies et des débits (les régimes et les valeurs annuelles) obtenues pour les 61 bassins versants des trois pays étudiés (21 en Haïti, 20 en Jamaïque et 20 à Porto Rico) ont été comparées entre elles. Ensuite, les indices de pluies présentés au tableau 8.1 ont été calculés pour les 61 bassins versants. Enfin, les valeurs de pluies et débits prédéterminés avec les méthodes GEV, Gumbel et Gradex pour les 61 bassins versants ont été comparés entre elles.

8.4 Résultats

8.4.1 Comparaison de la pluviométrie des deux périodes étudiées

8.4.1.1 Comparaison de la pluviométrie annuelle

La figure 8.1 présente les cumuls de pluies annuelles sur les deux périodes étudiées (1920-1940 et 1979-2017) sous forme de boîtes à moustaches où chaque boîte à moustache représente l'ensemble des cumuls de pluies annuelles sur l'une des deux périodes pour un bassin versant donné. Les résultats montrent que les cumuls de pluies annuelles de la période historique sont supérieurs à ceux de la période récente pour 14 des 21 bassins versants, voire même deux fois plus élevés pour certains bassins versants. Cinq des sept bassins versants où les pluies annuelles de la période récente sont supérieures à celles de la période historique sont situés dans la partie Nord d'Haïti (Q-024, Q-045, Q-056, Q-060 et Q-065).

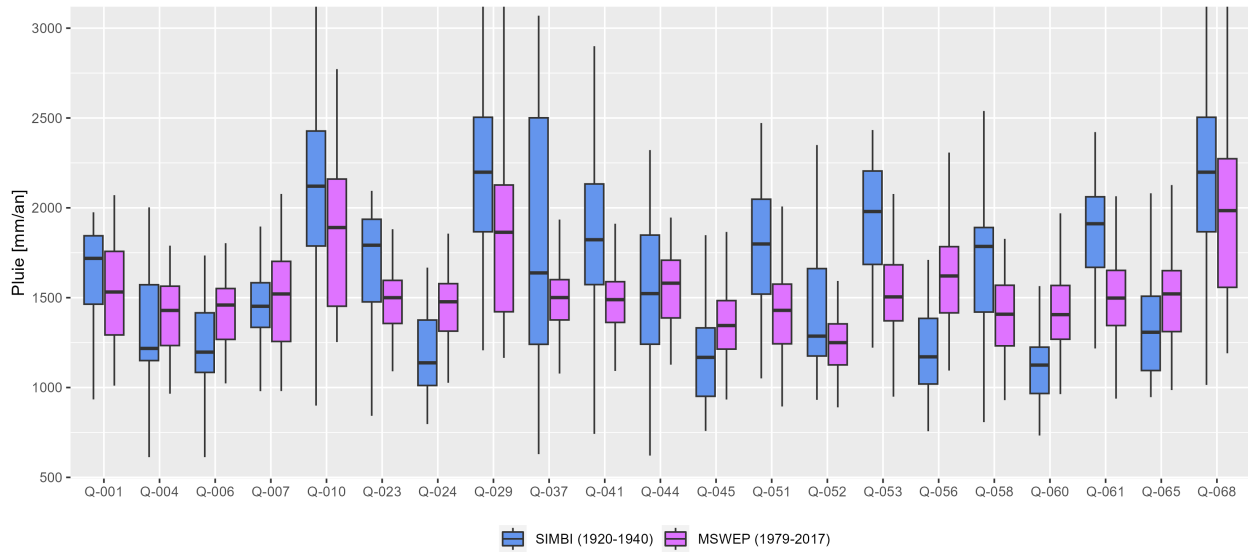


FIGURE 8.1 – Comparaison des cumuls de pluies annuelles sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

8.4.1.2 Comparaison des régimes de pluies

Les régimes de pluies pour les deux périodes étudiées, présentés à la figure 8.2, montrent que les cumuls de pluies mensuelles pour les mois réputés humides (mai et novembre) sont plus élevés pour la période historique que la période récente, et ceci même pour les sept bassins versants pour lesquels les pluies annuelles historiques étaient plus faibles que celles de la période récente. De plus, les pluies historiques sont supérieures à celles de la période récente pour presque tous les mois pour les 14 bassins versants pour lesquels les pluies annuelles historiques étaient plus élevées que celles de la période récente. Ces résultats montrent que la période historique, et principalement les deux saisons de fortes pluies en Haïti (ERS et LRS), semble être plus humide que la période récente.

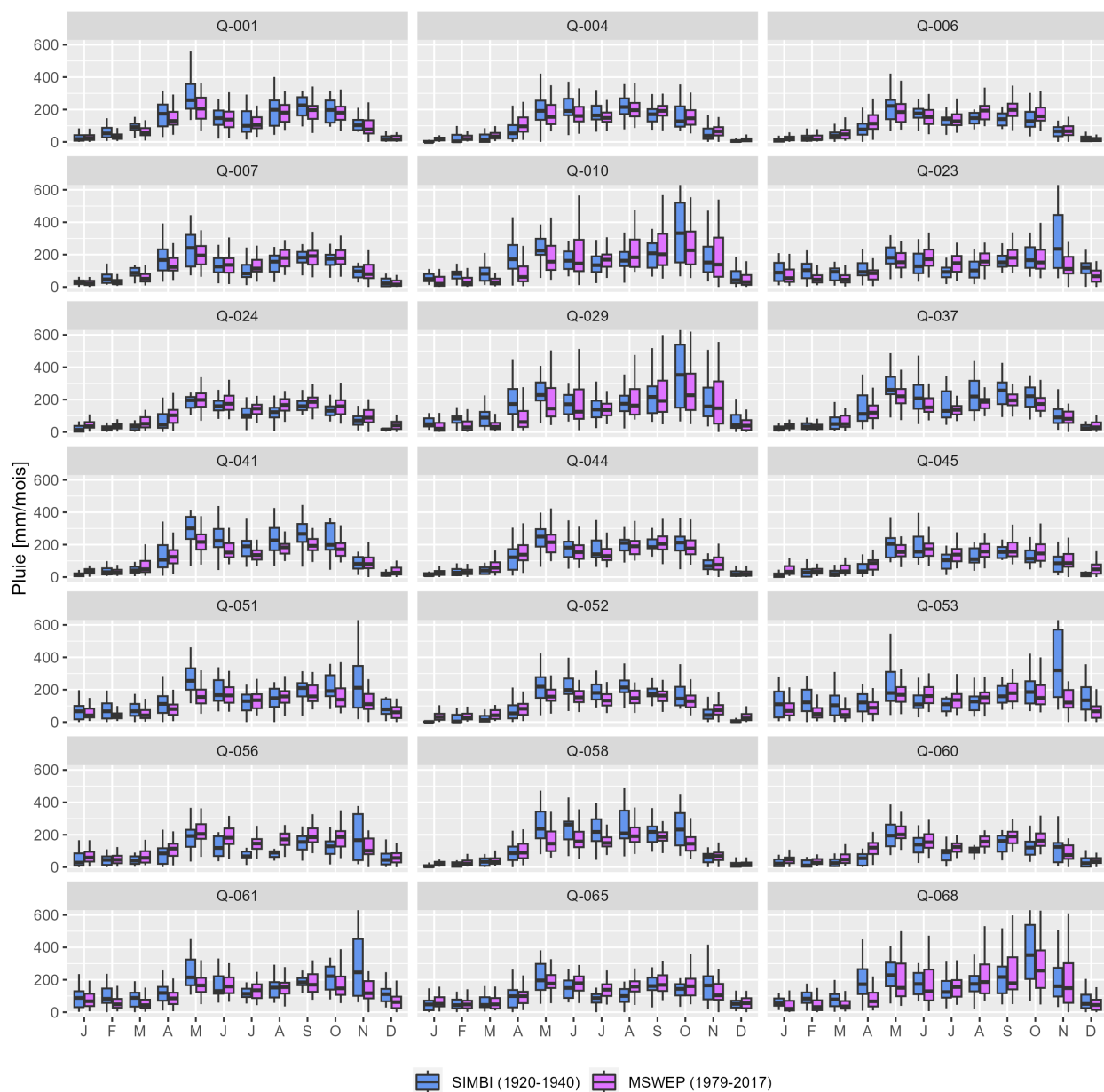


FIGURE 8.2 – Comparaison des régimes de pluies sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

8.4.1.3 Comparaison des indices climatiques

La figure 8.3 présente les comparaisons de sept indices climatiques sur les deux périodes étudiées (1920-1940 et 1979-2017) sous forme de boîtes à moustaches où les boîtes à moustaches représentent les résultats des indices pour l'ensemble des années de chacune des périodes étudiées. Les résultats semblent montrer que le nombre maximal de jours secs consécutifs (CDD) par année était plus élevé durant la période historique et inversement, le nombre maximal de jours humides consécutifs (CWD) était plus faible à la période historique pour la plupart des bassins versants. Par contre, le nombre de jours durant lesquels la pluie est supérieure à 10, 20 et 50 mm de pluies semble être plus élevé durant la période historique. Il n'y pas de tendance claire pour les pluies maximales annuelles (RX1day). Néanmoins, les pluies maximales annuelles semblent être plus faibles à la période historique pour certains bassins versants. Ce contraste entre un CWD plus faible et des R10mm, R20mm et R50mm plus élevés à la période historique semble indiquer que les pluies étaient plus intenses à la période historique qu'à la période récente. Ces intensités de pluies, représentées par l'indice SDII de la figure 8.3, sont 1.5 à 2 fois plus élevées à la période historique qu'à la période récente.

8.4.1.4 Comparaison des épisodes de fortes pluies

Les résultats de la figure 8.4 montrent que les épisodes de fortes pluies (épisodes dont les cumuls de pluies sont supérieurs à 50 mm) étaient plus fréquents durant la période historique. Les cumuls de pluies de ces épisodes sont du même ordre de grandeur pour les deux périodes étudiées, mais les durées de ces épisodes de fortes pluies étaient plus courtes à l'époque historique, ce qui se traduit par des épisodes de pluies plus intenses à l'époque historique.

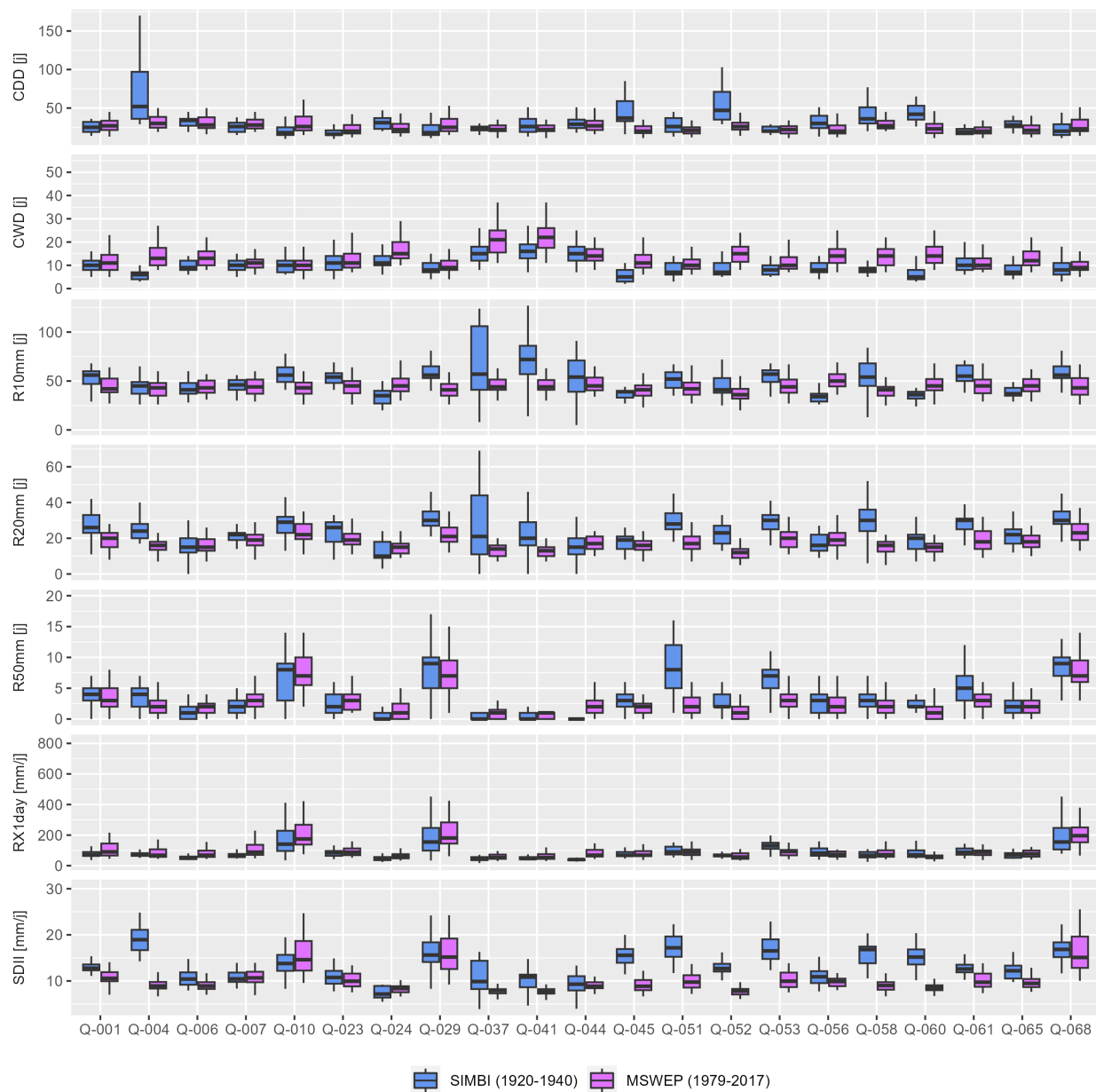


FIGURE 8.3 – Comparaison de sept indices climatiques sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

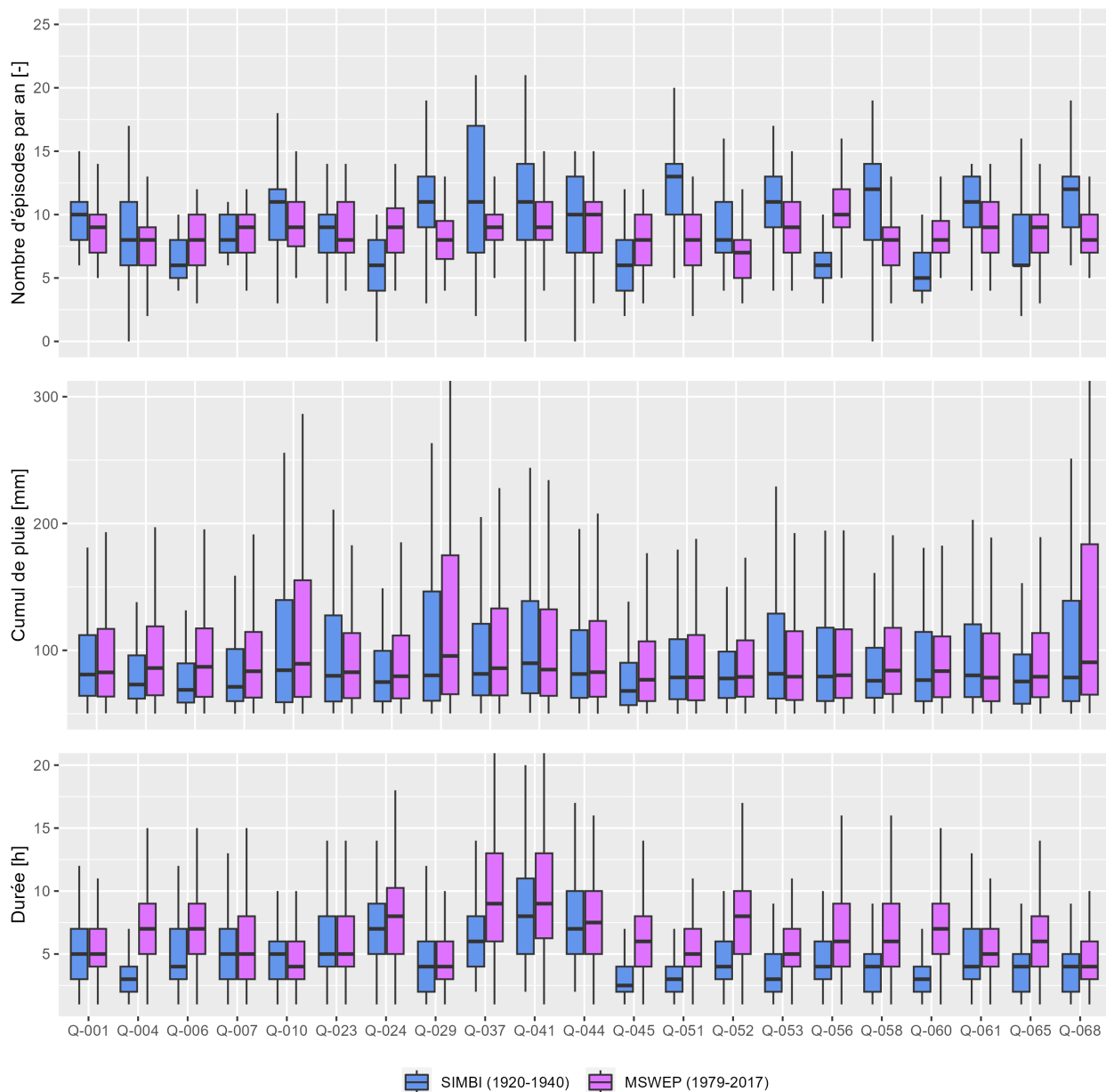


FIGURE 8.4 – Comparaison du nombre d'épisodes de fortes pluies(épisodes de pluies dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm), de leurs cumuls et de leurs durées sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

8.4.1.5 Comparaison des pluies prédéterminées sur les deux périodes

La figure 8.5 présente une comparaison des pluies prédéterminées sur les deux périodes étudiées. Sur cette figure, les barres verticales représentent les plages de valeurs calculées avec les minimum et les maximum des pluies prédéterminées avec les loi de Gumbel et de GEV. Les résultats montrent qu'il y a une forte différence entre les valeurs des pluies obtenues sur les deux périodes, avec des pluies qui peuvent être doublées d'une période à l'autre.

Contrairement aux valeurs de pluies moyennes (cumuls de pluies annuels et régimes des pluies), les pluies prédéterminées sur la période récente (1979-2017) sont plus élevées que celles prédéterminées sur la période historique. Ces résultats sont cohérents avec les résultats présentés sur la figure 8.3, sur laquelle on observe que les pluies maximales annuelles sont plus élevées sur la période récente que sur la période historique, car ce sont ces échantillons de pluies maximales annuelles qui sont utilisés pour la prédétermination des pluies.

Au premier ordre, il est contre-intuitif de constater que la période 1920-1940 soit l'une des périodes les plus humides depuis 1900, alors que les pluies prédéterminées sur cette même période sont plus faibles. Néanmoins, les cyclones tropicaux semblent jouer un rôle non négligeable. En effet, les évènements pluvieux liés aux cyclones tropicaux produisent des cumuls de pluies beaucoup plus élevés sur la période récente que sur la période historique. Les cumuls de pluies générés par les cyclones pendant la période 1920-1940 sont généralement limités à 70 mm (voir la figure 5.6) tandis qu'ils dépassent largement 100 mm pendant la période 1979-2017 (voir la figure 7.9). Ainsi, bien que la période 1920-1940 soit globalement plus humide que la période 1979-2017, les cyclones tropicaux semblent provoquer une augmentation des pluies maximales annuelles sur la période 1979-2017. Ces pluies maximales annuelles plus élevées impliquent donc des pluies pluies prédéterminées plus élevées sur la période 1979-2017.

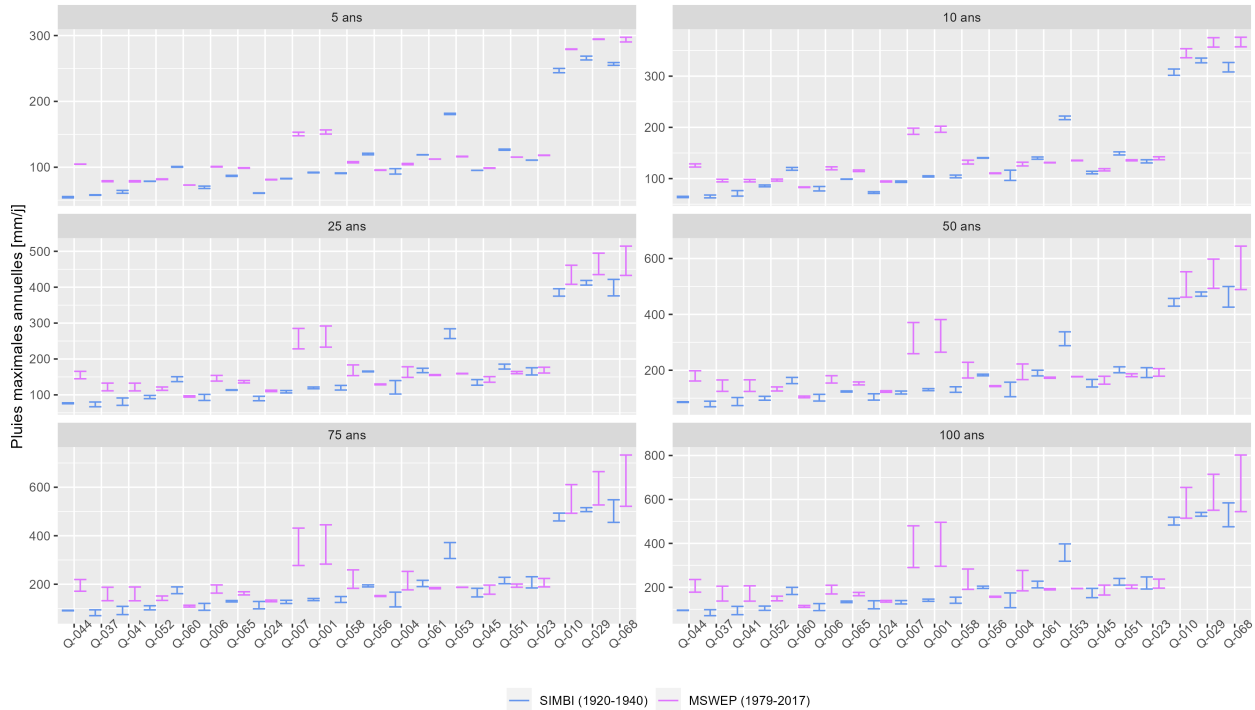


FIGURE 8.5 – Comparaison des pluies prédéterminées pour certaines périodes de retour sur la période historique (1920-1940), calculées avec les données Simbi, et celles de la période récente (1979-2017), calculées avec les données MSWEP pour les 21 bassins versants haïtiens.

8.4.2 Comparaison des débits des deux périodes étudiées

8.4.2.1 Comparaison des débits annuels et des régimes de débits

Comme pour les pluies, les résultats de la comparaison des débits annuels, présentés à la figure 8.6, et des régimes de débits, présentés à la figure 8.7 pour les deux périodes étudiées montrent que les débits semblent avoir été plus élevés durant la période historique qu'à la période récente. Ces résultats étaient attendus car les débits reflètent les cycles secs et humides observés dans les données de pluies.

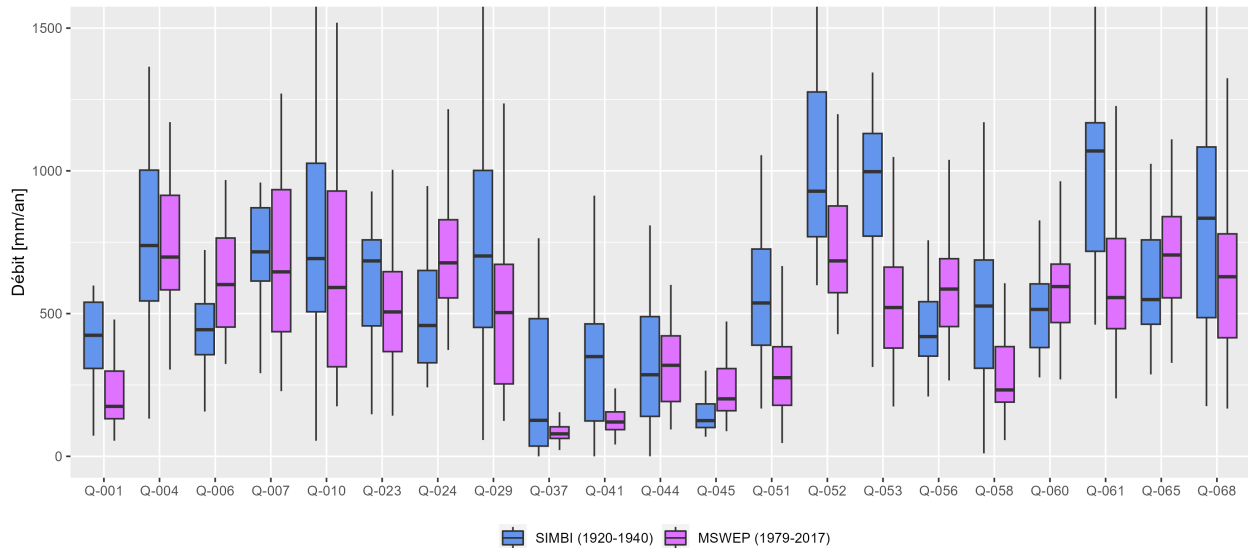


FIGURE 8.6 – Comparaison des débits annuels sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

8.4.2.2 Comparaison des débits prédéterminés sur les deux périodes

La comparaison des débits prédéterminés est présentée à la figure 8.8. Les résultats obtenus montrent que les débits prédéterminés présentent les mêmes tendances que les pluies prédéterminées, avec des valeurs globalement plus élevées pendant la période 1979-2017. Par contre, les écarts entre les débits prédéterminés sur les deux périodes sont relativement faibles, et les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur sur les deux périodes étudiées.

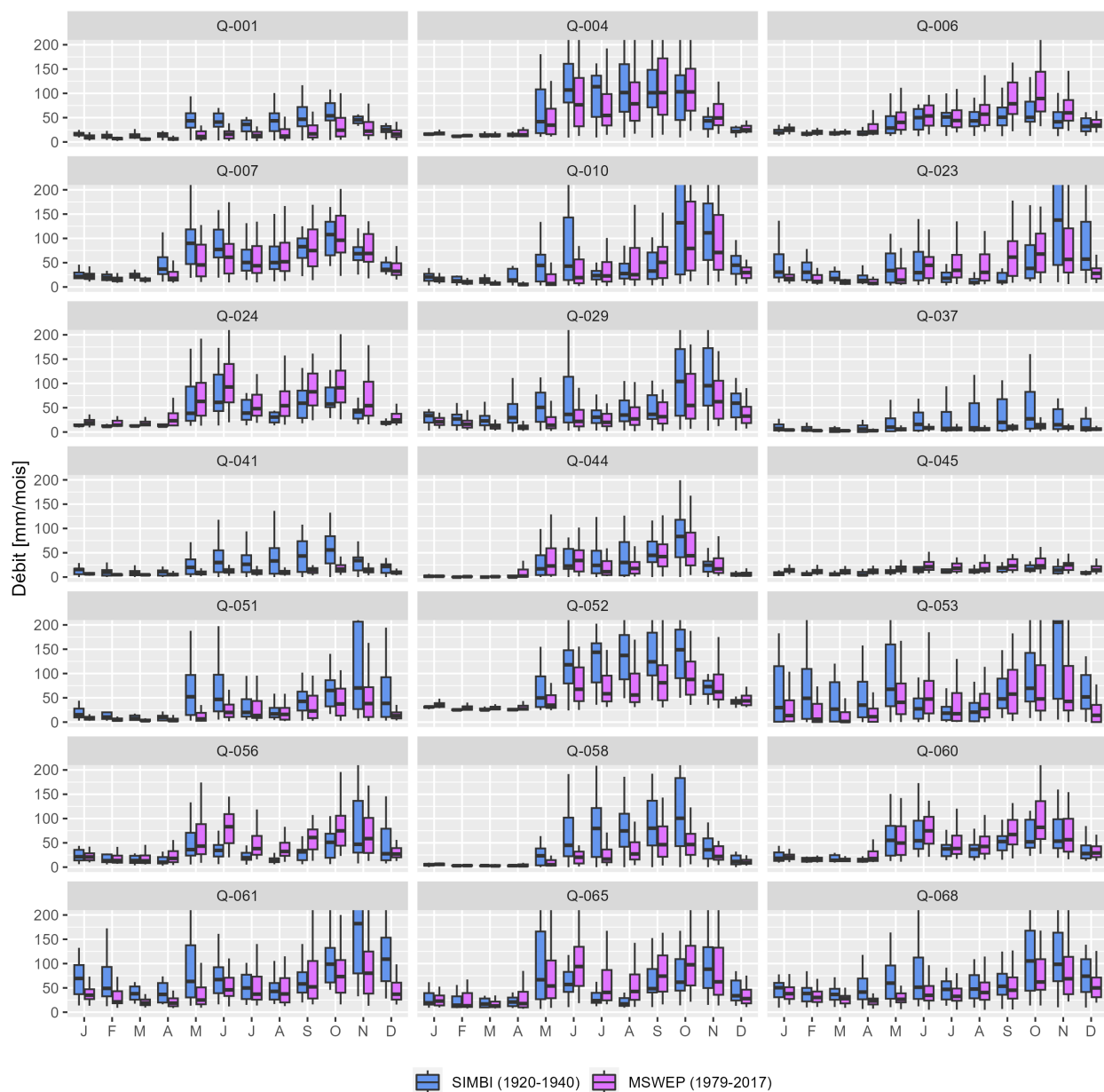


FIGURE 8.7 – Comparaison des régimes de débits sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP, sous forme de boîtes à moustaches pour chacun des 21 bassins versants haïtiens.

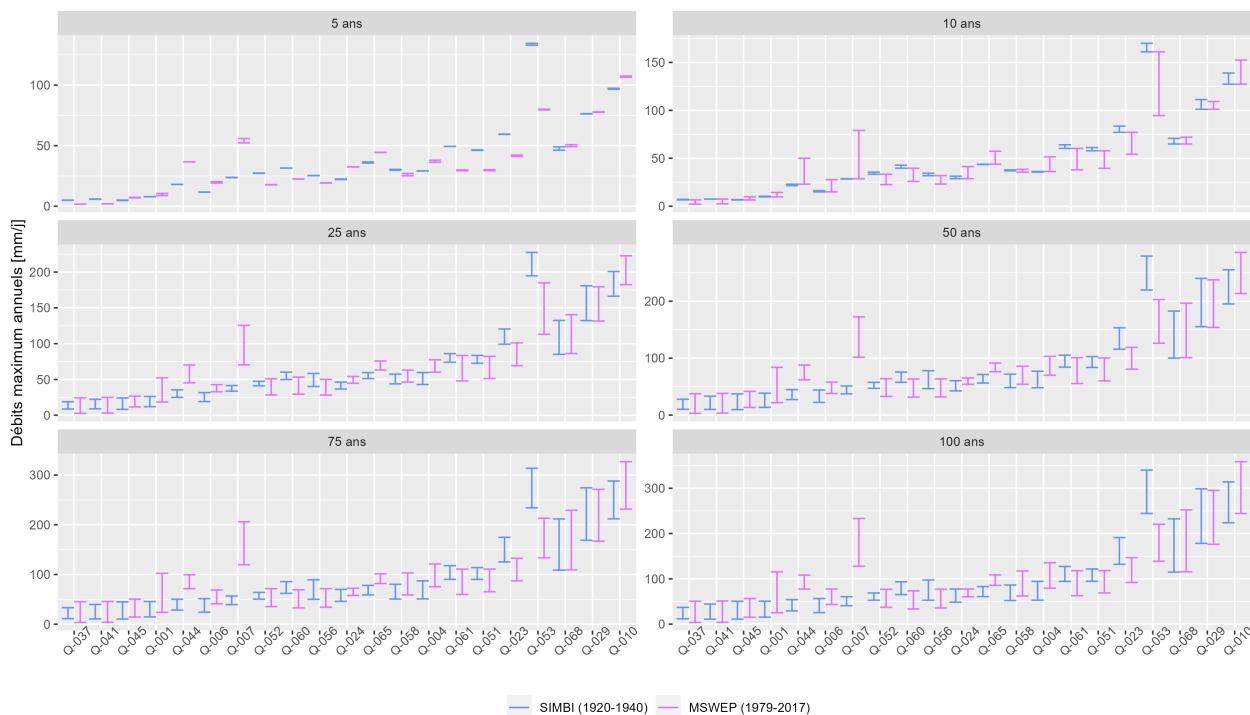


FIGURE 8.8 – Comparaison des quantiles de débits pour certaines périodes de retour sur la période historique (1920-1940), calculés avec les données Simbi, et ceux de la période récente (1979-2017), calculés avec les données MSWEP pour les 21 bassins versants haïtiens.

8.4.3 Analyse de la pluviométrie en Haïti entre 1900 et 2017

Les résultats présentés dans les paragraphes précédents ont montré que la période historique semble être plus humide que la période récente mais que les cyclones tropicaux intensifient les pluies maximales annuelles pendant la période récente. Ainsi, cette partie propose d'étudier l'évolution des pluies annuelles sur le XX^e siècle à partir de la base de données MORON et de la réanalyse 20CR.

La figure 8.9 présente l'évolution de la pluie annuelle en Haïti entre 1900 et 2017, à partir des bases de données de pluies 20CR, MORON et MSWEP. Les pluies annuelles MORON représentent une moyenne des pluies annuelles des stations pour lesquelles les données MORON sont disponibles. Les pluies annuelles MSWEP représentent une moyenne des pluies annuelles des mailles MSWEP correspondant aux stations MORON. Les données 20CR sont disponibles sur de grosses mailles, avec seulement quatre mailles 20CR sur Haïti. Ainsi, les pluies annuelles 20CR représentent la moyenne des pluies annuelles de ces quatre mailles. Les pluies annuelles obtenues avec MORON sont proches de celles obtenues avec 20CR entre 1920 et 1940, et à partir de 1940, les pluies annuelles de 20CR semblent être plus élevées que celles de MORON. De plus, les données 20CR semblent montrer que la période récente a été plus humide que la période historique. En effet, les pluies annuelles de la période récente sont supérieures à la ligne horizontale bleue qui représente la pluie annuelle moyenne sur la période historique. A l'inverse, les données MORON semblent montrer que la période récente a été plus sèche que la période historique. Les pluies annuelles obtenues avec MSWEP semblent être cohérentes avec celles obtenues avec les données MORON entre 1970-2000, date à laquelle s'achèvent les données MORON. Les pluies annuelles obtenues avec MSWEP semblent être cohérentes avec celles obtenues avec 20CR à partir de 2000.

Il est important de rappeler que les données 20CR ne sont pas des données observées mais des données de réanalyse issues d'un modèle climatique sans assimilation de données de pluies. De plus, ces données sont disponibles sur de grosses mailles (une maille 20CR représente environ 45% de la superficie d'Haïti). Dans ce contexte les données 20CR peuvent ne pas bien représenter l'évolution de la pluie moyenne annuelle en

Haïti. D'ailleurs, les données 20CR ne capturent pas les périodes de sécheresses dans les Caraïbes entre 1980-2000 (Hastenrath & Polzin, 2013). Parallèlement, les données MORON sont des données observées mais lacunaires. Ainsi, les ruptures liées à la disponibilité des stations peuvent influencer l'évolution des pluies annuelles présentée avec les données MORON.

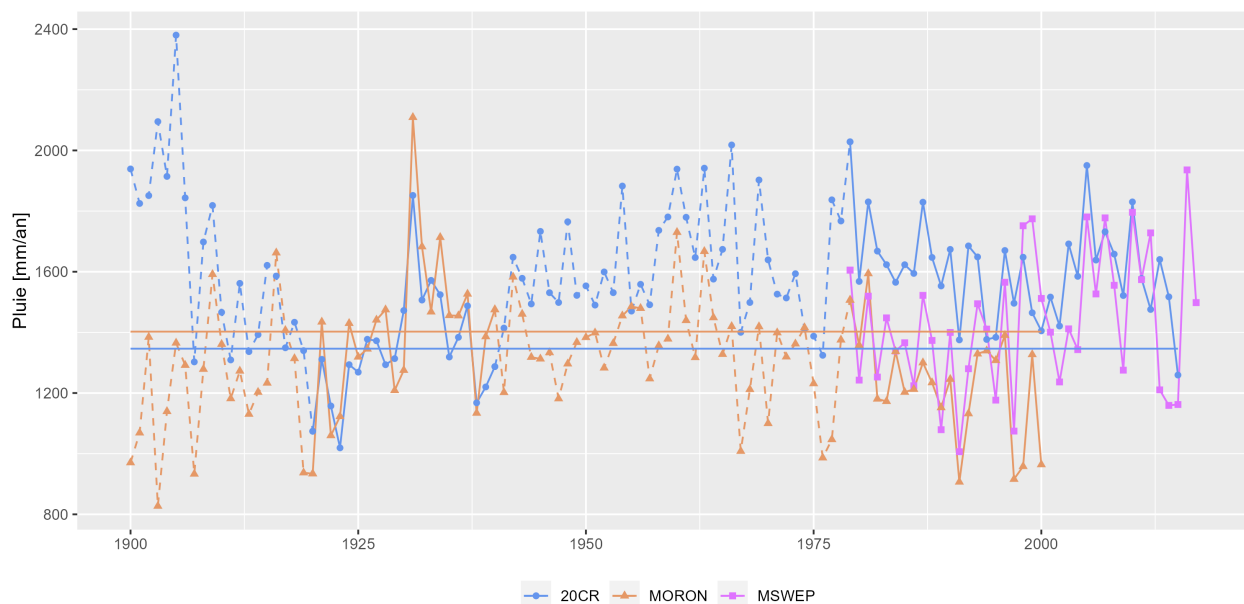


FIGURE 8.9 – Evolution de la pluviométrie annuelle en Haïti sur la période 1900-2017 avec les bases de données 20CR, MORON et MSWEP. Les lignes horizontales représentent les pluies moyennes annuelles calculées sur la période historique 1920-1940. La période historique et la période récente sont représentées par des lignes continues.

8.4.4 Cohérence des résultats obtenus à l'échelle des Antilles

Les résultats présentés dans les sections précédentes ont permis de faire une synthèse de l'hydrologie des bassins versants haïtiens sur le XX^{ème} siècle en comparant les résultats obtenus sur deux périodes distinctes. Dans cette section, nous allons tenter de voir si les résultats obtenus en Haïti sont cohérents avec ceux obtenus à l'échelle régionale, notamment dans les pays des Grandes Antilles. Ainsi, les résultats obtenus pour les 21 bassins versants en Haïti pendant la période récente (1979-2017) ont été comparés avec ceux obtenus pour 20 bassins versants en Jamaïque et 20 bassins versants à Porto Rico pour cette même période.

8.4.4.1 Comparaisons des pluies dans les Grandes Antilles

La figure 8.10 présente les régimes des pluies de 61 bassins versants dans les Grandes Antilles (21 bassins versants en Haïti, 20 bassins versants en Jamaïque et 20 bassins versants à Porto Rico) sous forme de boîtes à moustaches où chaque boîte à moustaches représente la pluie moyenne mensuelle de l'ensemble des bassins versants de l'un des pays des Grandes Antilles. Seules les données MSWEP ont été utilisées en Haïti et en Jamaïque. Les données MSWEP et les données pluviométriques de référence ont été utilisées à Porto Rico. Les résultats montrent que le régime de pluie bimodal typique des pays caribéens est bien représenté pour les trois pays étudiés. Les volumes de pluies sont du même ordre de grandeur pendant la saison de pluie de printemps (ERS), bien que Porto Rico semble être plus humide pendant le mois d'avril. A l'inverse, Porto Rico est plus sec que les deux autres pays en juin. Les pluies pendant la saison d'automne (LRS) sont moins abondantes en Haïti par rapport aux deux autres pays (Jamaïque et Porto Rico). De même, Haïti semble

être plus sec que les deux autres pays pendant l'hiver (WDS). MSWEP représente bien la pluviométrie en Porto Rico pendant les saisons des pluies (ERS, MSD, LRS) et surestime la pluie pendant l'hiver.

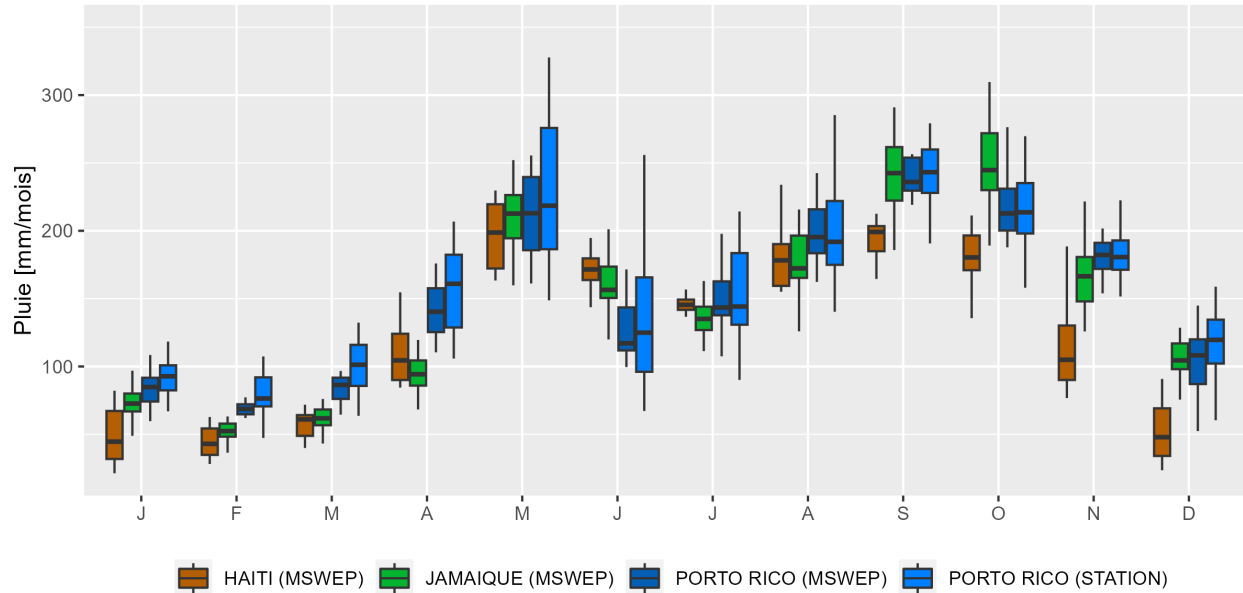


FIGURE 8.10 – Régimes des pluies de bassins versants pour les trois pays des Grandes Antilles sous forme de boîtes à moustaches. Les régimes en Haïti et en Jamaïque sont calculés avec les données MSWEP et ceux de Porto Rico sont calculés avec les pluviomètres de référence et MSWEP. De gauche à droite, on a les résultats pour : Haïti (pluies MSWEP), Jamaïque (pluies MSWEP), Porto Rico (pluies MSWEP) et Porto Rico (pluviomètres de référence).

La cartographie de la pluie moyenne annuelle est représentée à la figure 8.11 afin de mieux comprendre cette variabilité spatiale de la pluviométrie dans les Grandes Antilles. La pluviométrie moyenne annuelle dans les Grandes Antilles varie de 500 à plus de 2300 mm. Les zones les plus humides dans la région des Grandes Antilles est la Jamaïque, le sud-ouest d'Haïti, le sud-est de Cuba, l'est de la République Dominicaine et Porto Rico, avec une pluviométrie comprise entre 1600 et 2350 mm de pluies par année. Une pluviométrie autour de 1300 à 1600 mm est observée au nord de Cuba, au nord et au centre d'Haïti. Une pluviométrie inférieure à 1300 mm est observée au centre de Cuba, au nord-ouest d'Haïti et à l'ouest de la République Dominicaine. Bien qu'il n'y ait pas d'étude détaillée sur la variabilité de pluviométrie dans les Grandes Antilles, la topographie et les vents d'est semblent jouer un rôle important.

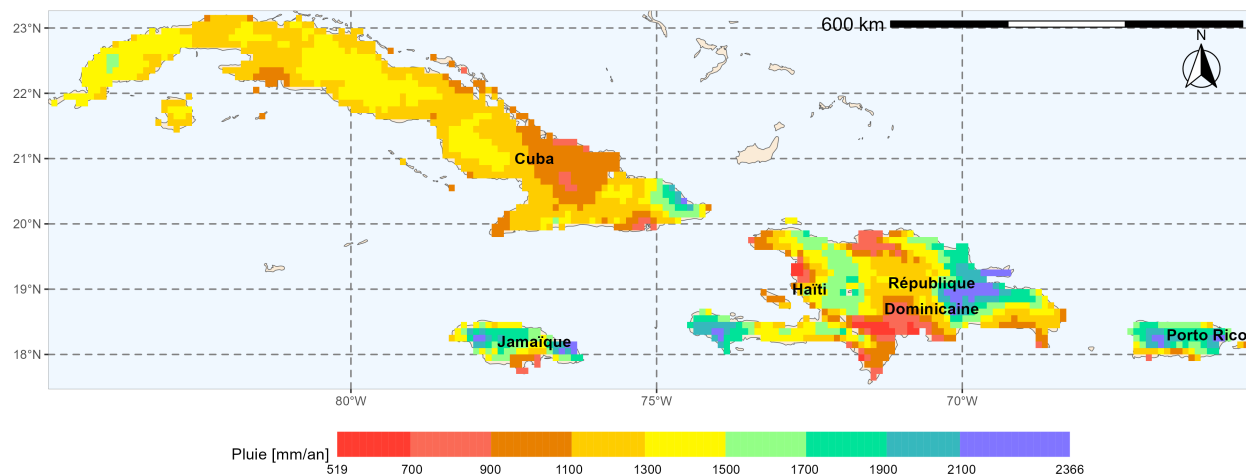


FIGURE 8.11 – Variabilité spatiale des pluies moyennes annuelles dans les Grandes Antilles calculée avec les données MSWEP disponibles sur la période 1979-2017.

La figure 8.12 présente l'évolution de la pluie moyenne annuelle (moyennée sur les bassins versants de chaque pays) pendant la période 1979-2017 pour les 61 bassins versants des Grandes Antilles. Les résultats montrent que dans l'ensemble, une période relativement sèche est observée entre 1980 et 2000 et une période relativement humide est observée à partir des années 2000. Cette alternance de période sèche et humide est bien représenté pour les pluies des bassins versants haïtiens (calculées avec MSWEP) et celles des bassins versant portoricains calculées avec les pluviomètres de référence, et moins marqué pour les pluies des bassins versants portoricains et jamaïcains calculées avec MSWEP. La décennie humide sur Porto Rico (2003-2013) n'a pas été bien représentée par les données MSWEP.



FIGURE 8.12 – Evolution des pluies annuelles sur la période 1979-2017 pour trois pays des Grandes Antilles. Les pluies annuelles présentées ici représentent les pluies annuelles moyennées sur les bassins versants de chaque pays. La ligne horizontale noire représente la pluie annuelle moyennée sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles la pluie annuelle est supérieure à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles la pluie annuelle est inférieure à la moyenne. Les pluies annuelles en Haïti et en Jamaïque ont calculés avec les données MSWEP et ceux de Porto Rico ont calculés avec les pluviomètres de référence et MSWEP.

La figure 8.13 présente les résultats de six indices climatiques pour l'ensemble des 61 bassins versants des Grandes Antilles sous forme de boîtes à moustaches. Le nombre de jours secs consécutifs (CDD) est autour de 26 jours par année (un peu moins d'un mois) en Haïti et en Jamaïque et autour de 18 jours en Porto Rico. Le nombre de jour de pluies consécutif (CWD) est autour de 14 jours par année en Haïti, environ 10 jours en Jamaïque et près de 18 jours en Porto Rico. Le nombre de jours par année où la pluie est supérieure à 10 mm (R10mm) se situe entre 40 et 45 en Haïti et en Jamaïque et un peu plus de 50 en Porto Rico. Le nombre de jours par année où la pluie est supérieure à 20 mm (R20mm) est autour de 20 pour les trois pays étudiés. Le nombre de jours où la pluie est supérieure à 50 mm (R50mm) est autour de 3 en Haïti et Porto Rico et deux fois plus en Jamaïque. La pluie semble être plus intense en Jamaïque que dans les deux autres pays (SDII). Les résultats de MSWEP sont souvent décalés par rapport à ceux obtenus pour les pluviomètres de référence à Porto Rico.

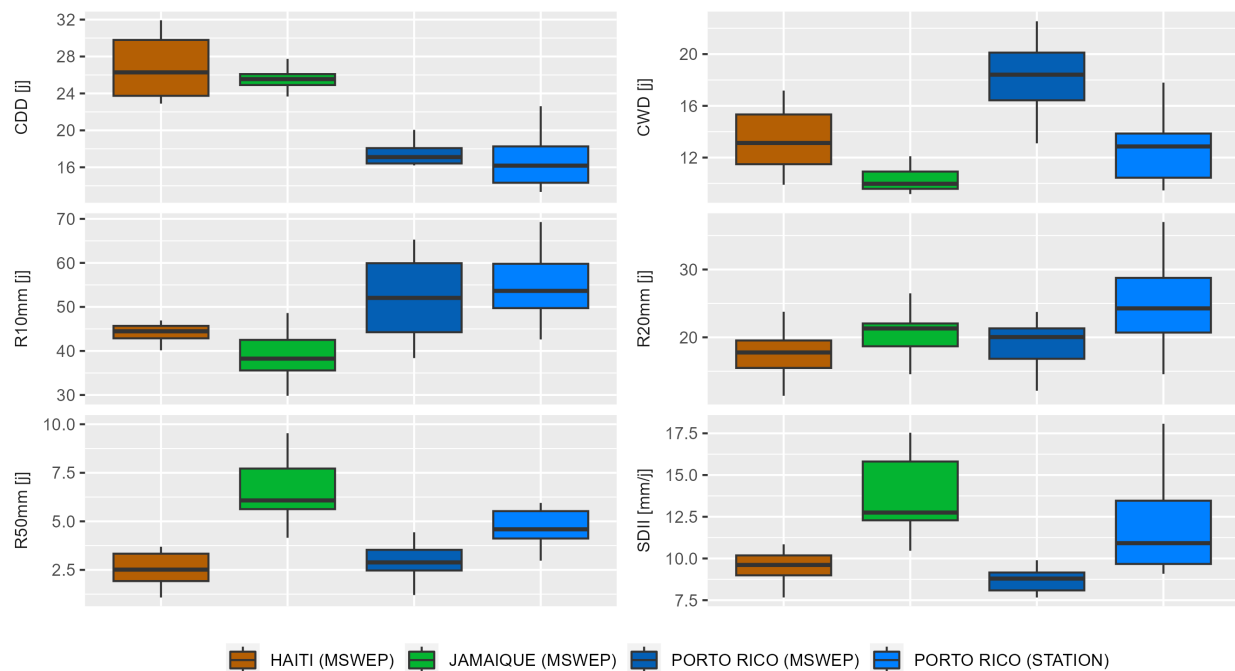


FIGURE 8.13 – Six indices de pluies fortes des bassins versants des Grandes Antilles. Les indices des bassins versants en Haïti et en Jamaïque sont calculés avec les données MSWEP et ceux de Porto Rico sont calculés avec les pluviomètres de référence et MSWEP. De gauche à droite, on a les résultats pour : Haïti (pluies MSWEP), Jamaïque (pluies MSWEP), Porto Rico (pluies MSWEP) et Porto Rico (pluviomètres de référence).

Les pluies prédéterminées pour certaines périodes de retours sont présentés à la figure 8.14 sous forme de boîtes à moustaches. Les résultats montrent que les pluies prédéterminées sont plus élevées en Jamaïque et plus faibles en Haïti. De plus, les valeurs de pluies obtenues avec MSWEP sont très proches de celles obtenues avec les pluviomètres de référence pour Porto Rico.

En somme, Porto Rico est l'un des pays les plus humides parmi ceux étudiés avec des cumuls de pluies mensuelles et annuelles les plus élevés dans les Grandes Antilles. La Jamaïque est le pays où les fortes pluies sont les plus fréquentes et les plus abondantes avec des indices R50mm, SDDI et des quantiles de fortes pluies les plus élevés. Haïti semble être le pays le moins humide parmi les trois pays étudiés. Malheureusement, nous n'avons pas eu de données sur des bassins versants à Cuba et en République Dominicaine. Néanmoins, la cartographie des pluies annuelles semble montrer que Cuba est le pays le plus sec et une pluviométrie très variable en République Dominicaine avec, une zone très humide à l'est et une zone plus ou moins sèche à l'ouest.

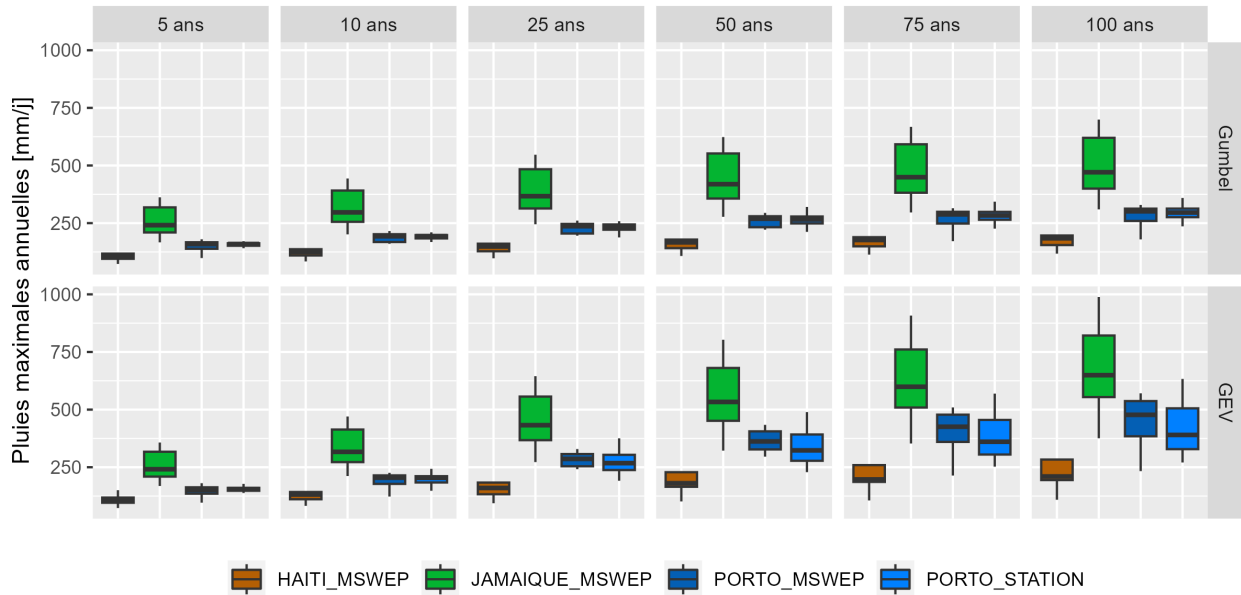


FIGURE 8.14 – Prédétermination des pluies pour certaines périodes de retour pour des bassins versants des Grandes Antilles sous forme de boîtes à moustaches. Chaque boîte à moustaches représente les valeurs de pluies pour une méthode et pour l'ensemble des bassins versants d'un des trois pays. Les valeurs de pluies en Haïti et en Jamaïque sont calculées avec les données MSWEP et celles de Porto Rico sont calculées avec les pluviomètres de référence et MSWEP. De gauche à droite, on a les résultats pour : Haïti (pluies MSWEP), Jamaïque (pluies MSWEP), Porto Rico (pluies MSWEP) et Porto Rico (pluviomètres de référence).

8.4.4.2 Comparaison des débits dans les Grandes Antilles

Comme pour la pluviométrie, le régime de débits (débits simulés en Haïti et débits observés en Jamaïque et à Porto Rico), présenté à la figure 8.15, présente deux pics de forts débits : le premier pic se situe au mois de mai et correspond à la saison de pluie ERS et le second pic se situe entre septembre et novembre et correspond à la saison de pluie LRS. Les débits sont moins élevés entre les mois de juin à août qui correspondent à la saison de pluie MSD. Les débits sont relativement faibles pendant l'hiver. Les débits moyens sont du même ordre de grandeur pour les trois pays étudiés. Cependant, les débits mensuels sont très variables d'un bassin versant à l'autre en Jamaïque où les débits peuvent atteindre 200 mm/mois sur un bassin versant et 10 fois moins sur un autre.

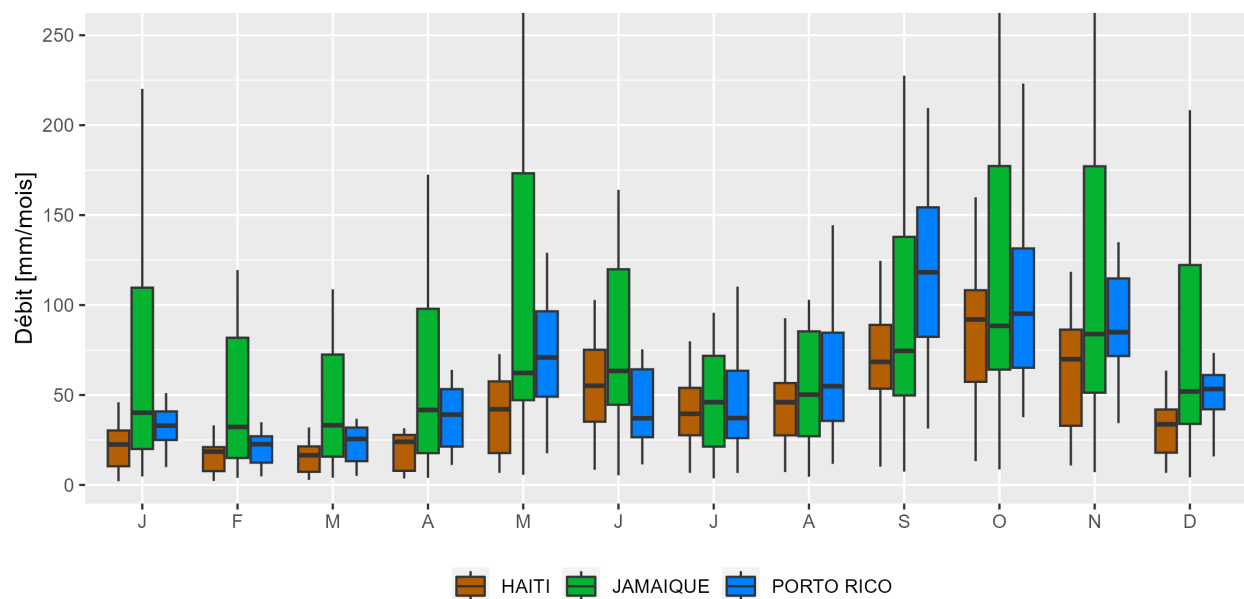


FIGURE 8.15 – Régimes des débits des bassins versants de trois pays des Grandes Antilles. Des débits observés ont été utilisés en Porto Rico et en Jamaïque et des débits simulés ont été utilisés en Haïti.

Comme pour les pluies, une alternance de période avec des débits relativement faibles et relativement élevés est également observée (voir la figure 8.16), avec des plus faibles débits sur la période 1980-2000 et une période de plus forts débits à partir des années 2000. Cette alternance de débit est bien marquée en Haïti (débits simulés) et un peu moins en Porto Rico et en Jamaïque (débits observés).

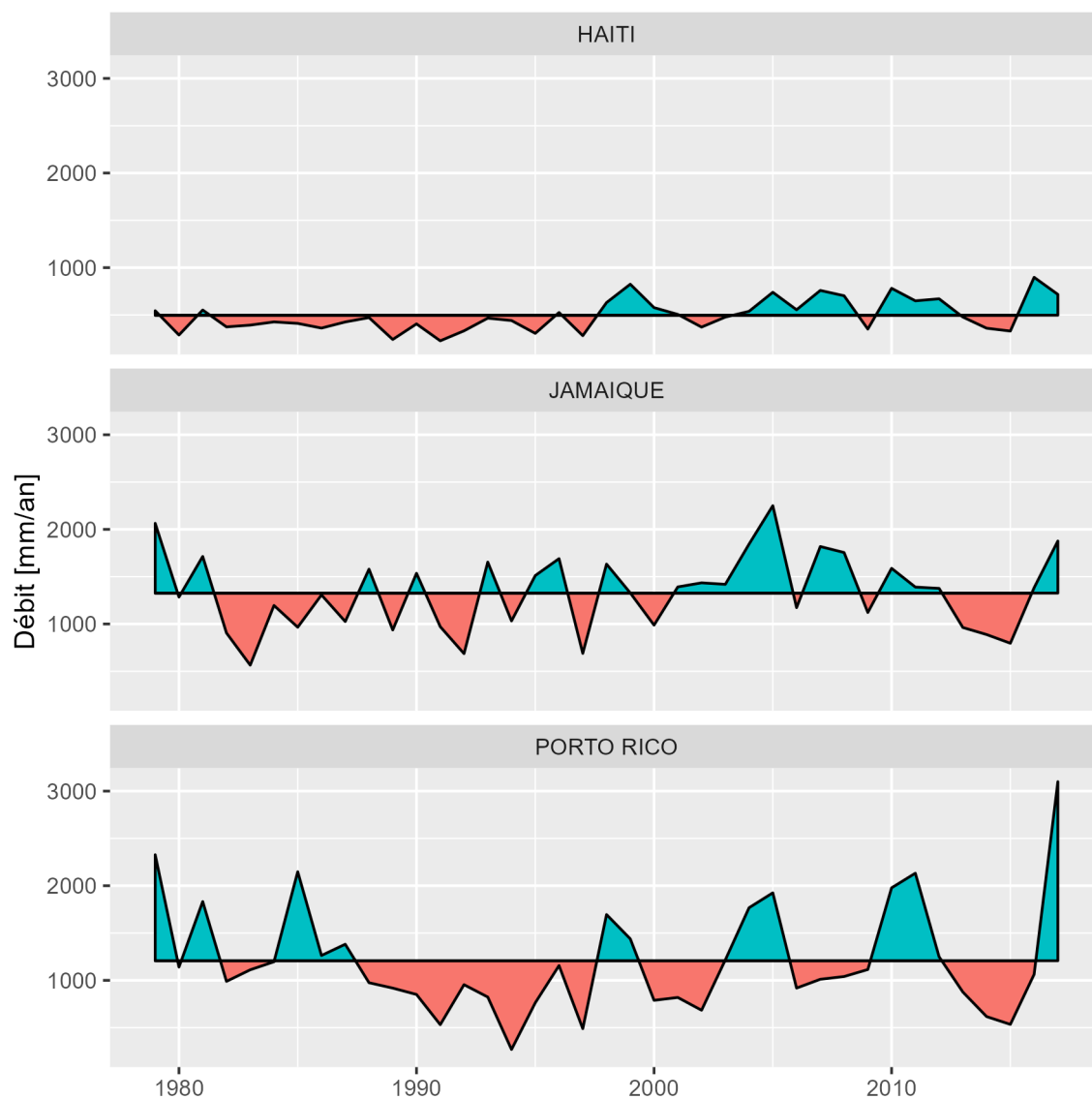


FIGURE 8.16 – Evolution des débits annuels sur la période 1979-2017 pour trois pays des Grandes Antilles. Les débits annuels présentés ici représentent les débits annuels moyennés sur les bassins versants de chaque pays. La ligne horizontale noire représente le débit annuel moyenné sur la période 1979-2017. En bleu, les années pour lesquelles le débit annuel est supérieur à la moyenne. En rouge, les années pour lesquelles le débit annuel est inférieur à la moyenne. Des débits observés ont été utilisés en Jamaïque et à Porto Rico et des débits simulés ont été utilisés en Haïti.

Les débits prédéterminés ont été calculés à partir de trois méthodes différentes et sont présentés à la figure 8.17. Les résultats montrent que les débits obtenus avec la loi GEV sont plus élevés et ceux obtenus avec la loi Gumbel sont les plus faibles. Les débits prédéterminés sont cohérents à l'échelle des Grandes Antilles bien que, les débits en Haïti soient nettement plus faibles que ceux des deux autres pays.

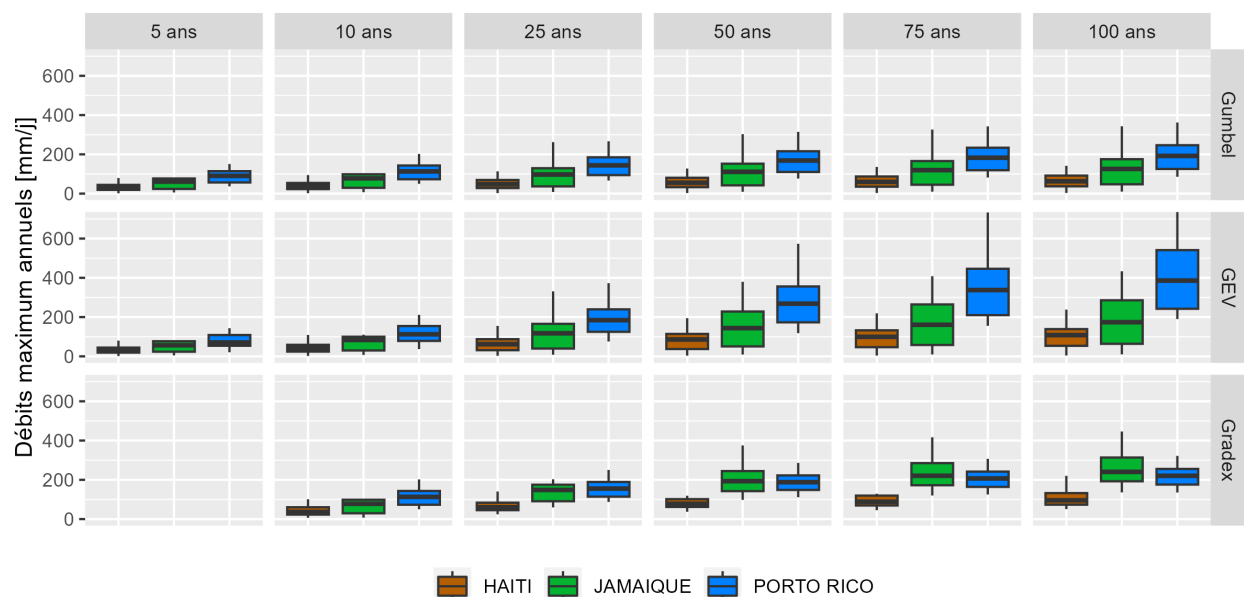


FIGURE 8.17 – Prédétermination des débits pour certaines périodes de retour des 61 bassins versants des Grandes Antilles sous forme de boîtes à moustaches. Chaque boîte à moustaches représente les débits pour une méthode et pour l'ensemble des bassins versants d'un des trois pays.

8.5 Conclusion du chapitre

La première partie de ce chapitre a permis de comparer les pluies et les débits de 21 bassins versants haïtiens sur deux périodes différentes : une période qualifiée d'historique (1920-1940) et une période qualifiée de récente (1979-2017). Premièrement, les régimes de pluies et de débits ainsi que les pluies et débits annuels obtenus sur les deux périodes ont été comparés. Puis, plusieurs indices climatiques tels que le nombre de jours consécutifs de pluies, le nombre de jours consécutifs secs, le nombre de jour où les pluies dépassent 10, 20 et 50 mm respectivement ont été comparés sur les deux périodes. Enfin, le nombre, les cumuls et les durées des épisodes de fortes pluies (épisodes de pluies dont les cumuls dépassent 50 mm) ainsi que les pluies et débits prédéterminés avec les méthodes GEV, Gumbel et Gradex obtenus sur les deux périodes étudiées ont été comparés.

Les résultats obtenus ont montré que la période 1920-1940 semble être l'une des périodes les plus humides en Haïti pendant le XX^{ème} siècle, avec les pluies et débits moyens mensuels et annuels, les nombres de jours de fortes pluies, les nombres et les intensités de fortes pluies qui sont nettement plus élevés pendant la période historique (1920-1940) que la période récente (1979-2017) pour la plupart des bassins versants étudiés. Par contre, les pluies maximales annuelles obtenues sur la période historique sont plus faibles que celles obtenues sur la période récente. Il est possible que les cyclones tropicaux jouent un rôle non négligeable car les événements pluvieux liés aux cyclones tropicaux produisent des cumuls de pluies beaucoup plus élevés sur la période récente, ce qui peut être l'une des raisons qui explique que les pluies maximales annuelles soient plus élevées sur la période récente. Cette hypothèse doit être vérifiée par des études complémentaires.

La base de données mensuelles de Moron *et al.* (2015) semble montrer que la période 1920-1940 a été effectivement l'une des périodes les plus humides d'Haïti. Cependant, cette base de données est lacunaire, et

les ruptures dans les séries peuvent influencer les résultats. A l'inverse, l'analyse des données de pluies de la réanalyse 20CR a montré que la période 1920-1940 a été plus sèche que la période récente. Cependant, ces données ne sont pas des données observées mais des données issues d'une réanalyse n'assimilant pas de données de pluies, et sont disponible sur des grosses mailles (une maille 20CR représente environ 45% de la superficie d'Haïti). De plus, les données 20CR ne représentent pas bien les alternances de périodes sèches et humides identifiées dans les Caraïbes, et notamment la période sèche identifiée en 1980 (Hastenrath & Polzin, 2013; Moron *et al.*, 2015). Ainsi, il est difficile, avec cette analyse de différentes bases de données, de conclure si la période historique a été effectivement plus humide, si les différences observées sur les deux périodes sont liées aux différences entre les bases de données considérées.

La deuxième partie de ce chapitre a permis d'étudier la cohérence des résultats obtenus en Haïti à l'échelle régionale. De ce fait, la variabilité spatiale de la pluie moyenne annuelle a été étudiée à l'échelle des Grandes Antilles avec les données de pluies MSWEP. Les régimes de pluies et de débit, plusieurs indices climatiques tels que le nombre de jours consécutifs de pluies, le nombre de jours consécutifs secs, le nombre de jours où les pluies dépassent 10, 20 et 50 mm respectivement ont été étudiés pour 20 bassins versants en Jamaïque et 20 bassins versants à Porto Rico et ont été comparés à ceux obtenus en Haïti à l'époque récente. Enfin, les pluies et débits prédéterminés avec les méthodes GEV, Gumbel et Gradex en Jamaïque et à Porto Rico ont été comparés avec ceux obtenus en Haïti pour la période récente. Les données des pays des Grandes Antilles sont disponibles pour la période récente. Ainsi, ces comparaisons ont été réalisées sur la période récente.

Les résultats des comparaisons des pluies et des débits dans les Grandes Antilles ont montré que les valeurs obtenues sont du même ordres de grandeurs et sont cohérents à l'échelle régionale. Cependant, la pluviométrie est très hétérogène à l'échelle des Grandes Antilles. En effet, la Jamaïque, le sud-ouest d'Haïti, Porto-Rico et la partie est de la République Dominicaine ont une pluviométrie annuelle autour de 2000 mm tandis que Cuba, la partie ouest de la République Dominicaine et le nord-ouest d'Haïti on une pluviométrie annuelle autour de 1100 mm. Les fortes pluies sont plus fréquentes sur les bassins versants jamaïcains avec les nombres de jours où la pluie dépassent 50 mm et les quantiles des fortes pluies étant plus élevés en Jamaïque. A l'inverse, les bassins versants haïtiens sont les plus secs parmi les bassins des Grandes Antilles étudiés. Une alternance de période sèche (entre 1980 et 2000) et humide (à partir des années 2000) a été identifiée à la fois dans les pluies (MSWEP et pluviomètres de référence) et les débits (simulés et observés). Cette alternance de période humide et sèche à l'échelle régionale, cohérent avec les résultats de Taylor *et al.* (2002), est beaucoup plus marquée pour les pluies de bassin versant obtenues avec les pluviomètres de référence à Porto Rico, et un peu moins marquée pour les pluies de bassins versants obtenues avec MSWEP.

Chapitre 9

Conclusions générales et perspectives

9.1 Objectifs de ce chapitre

Haïti est un pays très exposé aux aléas hydrométéorologiques et subit régulièrement les dégâts provoqués par ces événements qui causent de nombreux morts, des dégâts colossaux et affectent durablement les secteurs de l'agriculture et de l'élevage, deux secteurs clefs dans l'économie haïtienne. En raison de la situation socio-économique précaire d'Haïti, le pays a des difficultés à se relever de ces événements destructeurs, ce qui a pour conséquence d'augmenter sa vulnérabilité face à ces aléas. Malheureusement, peu d'études ont été réalisées sur ces thématiques en Haïti car les données hydrométéorologiques sont quasi-inexistantes ou difficilement accessibles. Ainsi, les objectifs de cette thèse ont été :

1. d'étudier les relations entre les variables climatiques (pluies et températures) et hydrologiques (débits) et de faire ressortir les principales caractéristiques des bassins versants haïtiens,
2. d'étudier les régimes ainsi que les variabilités interannuelles de pluies et de débits,
3. de caractériser les cumuls, les durées et l'évolution spatio-temporelle des épisodes de fortes pluies ainsi que les débits maximum associés.
4. de faire une analyse fréquentielle des pluies et débits de plusieurs bassins versants haïtiens, afin d'obtenir des valeurs de pluies et débits pour différentes périodes de retour, principalement les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans.

Pour cela, l'ensemble des données hydrométéorologiques, dont certaines archives papiers, disponibles en Haïti ont été rassemblées. La plupart de ces données sont disponibles sur la période historique 1920-1940. Ainsi, la première partie de cette thèse a consisté à constituer une base de données hydrométéorologiques historique en Haïti puis de faire une analyse de l'hydrologie haïtienne sur cette période historique 1920-1940.

Plusieurs bases de données de pluies maillées ont été produites ces dernières années à l'échelle mondiale. Ainsi, la deuxième partie de cette thèse a consisté à exploiter ces bases de données de pluies alternatives pour l'étude de l'hydrologie en Haïti. Cependant, la performance de ces bases de données de pluies maillées dépend des régions étudiées. Ainsi, la performance de plusieurs bases de pluies maillées a été évaluée à l'échelle des Grandes et des Petites Antilles. Ensuite, la base de données de pluies maillées la plus performante a été utilisée pour étudier l'hydrologie en Haïti sur une période plus récente.

Ce chapitre propose donc de présenter les principales conclusions obtenues sur les deux périodes étudiées : la période historique (1920-1940) et la période récente (1979-2017). Ensuite les apports de cette thèse et enfin les perspectives ont été présentés.

9.2 Analyse de l'hydrologie haïtienne sur la période historique

Dans un premier temps, les données hydrométéorologiques disponibles en Haïti ont été rassemblées. Ces données sont formées par 156 séries de pluies mensuelles constituées par Moron *et al.* (2015) et disponibles sur la période 1905-2005, 70 séries de débits journaliers disponibles sur la période 1920-1940 et des archives papiers contenant des données de pluies et de températures de l'air. Les données des archives papiers disponibles sur la même période que les séries de débits (1920-1940) ont été jugées prioritaires et ont été numérisées. Ainsi, 59 séries de pluies journalières disponibles sur la période 1920-1940 et 23 séries de températures de l'air mensuelles disponibles sur la période 1926-1939 ont été numérisées. Ensuite, ces données ont été croisées par modélisation pluie-débit à l'aide des modèles conceptuels globaux GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) afin de simuler des séries de débits mensuels et journaliers continues sur la période 1920-1940. Enfin, les données observées et simulées ont été utilisées pour caractériser 24 bassins versants haïtiens à partir de 48 indices et signatures hydrologiques couvrants six classes d'attributs topographique, géologique, hydrogéologique, d'occupation de sol, climatique et hydrologique. L'ensemble des données observées et simulées et les indices et signatures hydrologiques constituent la base de données Simbi (du nom du gardien de la pluie, des eaux douces et des fleuves dans la mythologie haïtienne). La base de données Simbi (Bathelemy *et al.*, 2023a, b), première base de données hydro-climatiques en Haïti, contient des données observées et des données à l'échelle des bassins versants.

La base de données Simbi a été ensuite utilisée pour analyser l'hydrologie en Haïti sur la période 1920-1940. Les principaux résultats obtenus ont montré que parmi les 21 bassins versants analysés, 16 ont un régime de pluies et de débits bimodal, c'est à dire avec deux pics de pluies/débits. Le premier pic est observé en mai et le deuxième pic est observé entre septembre et novembre. Les mois les plus humides peuvent générer entre 200 et 400 mm de pluies en moyenne. Les résultats ont aussi montré que les années 1920 à 1925 ont été relativement sèches, avec une pluviométrie moyenne annuelle entre 1000 et 2000 mm, et la période 1925-1935 a été relativement humide, avec une pluviométrie moyenne annuelle entre 2000 et 3000 mm.

En moyenne, entre 7 à 12 épisodes de fortes pluies (épisodes de pluies dont les cumuls sont supérieurs à 50 mm) par an ont été identifiés sur chacun des 21 bassins versants étudiés. Ces épisodes de fortes pluies sont plus fréquents dans le sud-ouest d'Haïti et ont été observés généralement pendant les mois de mai et entre septembre et novembre, généralement ceux dont les cumuls sont entre 650 et 800 mm ont générés des débits pouvant atteindre 150 mm/j et même plus.

Les lois statistiques classiques Gumbel (Gumbel, 1958) et GEV (Beirlant *et al.*, 2004 ; Coles, 2001 ; Jenkinson, 1955) et la méthode du Gradex (Guillot & Duband, 1967) ont été utilisées pour la prédétermination des pluies et des débits pour plusieurs périodes de retour. Des différences significatives ont été observées entre les pluies et débits prédéterminés par les différentes méthodes. En plus des incertitudes liées à la méthode utilisée, il existe d'autres types d'incertitudes telles que celles liées à la qualité et la longueur des séries de données utilisées. Néanmoins, l'analyse de ces incertitudes n'a pas été abordée dans cette thèse. Les pluies centennales ont été estimées à 450-500 mm/j pour les bassins versant situés dans le sud-ouest d'Haïti, et 100-200 mm/j ailleurs. Les débits décennaux ont quant à eux été estimés comme étant proches de 200 mm/j pour les bassins versants du sud-ouest, et entre 30 et 100 mm/j ailleurs. Ce travail constitue la première analyse fréquentielle des pluies et débits haïtiens.

9.3 Analyse de l'hydrologie haïtienne sur la période récente

Depuis plusieurs années, des produits de pluies maillées issues de différentes techniques de télédétection (Kucera *et al.*, 2013 ; Rahman & Di, 2017) ont vu le jour. Ces données sont disponibles de manière continue (sans lacunes) sur au moins 30 ans, et sont donc largement utilisées dans le monde, principalement dans les régions peu instrumentées (Gosset *et al.*, 2023, 2013). Par contre, la performance des produits de pluies maillées varie en fonction de la zone d'étude, et à date, une seule évaluation de la performance de ces produits de pluies maillées a été réalisée dans le région caribéenne par Centella-Artola *et al.* (2020) mais au pas de temps mensuel, ce qui représente une forte limite lorsque l'on s'intéresse aux crues. Ainsi, la performance de cinq produits de pluies maillées [MSWEP (Beck *et al.*, 2019), CHIRPS (Funk *et al.*, 2015b), ERA-5

(Hersbach *et al.*, 2020), GPM-IMERG (Huffman *et al.*, 2015) et PERSIANN-CDR (Ashouri *et al.*, 2015)] ont été évaluée dans les Grandes et les Petites Antilles. Ces cinq produits de pluies ont été choisis en fonction de leurs performances au pas de temps mensuel et de leurs disponibilités au pas de temps journalier.

Les principaux résultats obtenus ont montré que les scores des métriques statistiques sont relativement bons pour le produit de pluies maillées MSWEP, c'est à dire que MSWEP donne de bonnes estimations des quantités de pluies ainsi que les jours sans pluie et les jours pluvieux dans les Antilles. De plus, MSWEP représente bien les régimes de pluie ainsi que les quantiles de fortes pluies dans les Antilles. Le produit de pluies maillées CHIRPS représente bien les régimes de pluies et les quantiles de fortes pluies, mais les scores des métriques statistiques sont relativement faibles. Les scores KGE du produit de pluies maillées PERSIANN-CDR sont relativement bons et représentent bien les régimes des pluies. Par contre, PERSIANN-CDR ne représente pas bien les jours sans pluie et les jours pluvieux ainsi que les quantiles de fortes pluies. Le produit de pluies maillées ERA-5 représente bien les jours sans pluie ainsi que les régimes de pluies, mais a des scores KGE relativement faibles, et ne représente pas bien les quantiles de fortes pluies. Enfin, le produit de pluies maillées GPM IMERG représente bien uniquement les jours sans pluie et les jours pluvieux et est mauvais pour les autres tests. Ainsi, le produit de pluies maillées MSWEP est le plus performant parmi les 5 cinq produits de pluies maillées évalués. De ce fait, le produit MSWEP a été utilisé comme base de données de pluies de référence pour l'analyse de l'hydrologie en Haïti sur la période récente (1979-2017).

Les régimes et les variabilités interannuelles des pluies ont été étudiés à partir de la base de données de pluies MSWEP. Les résultats obtenus ont montré que la pluviométrie annuelle est très hétérogène en Haïti, la topographie accidentée d'Haïti et l'orientation des chaînes de montagnes semblent jouer un rôle dans cette forte variabilité (Moron *et al.*, 2015). Le sud-ouest d'Haïti est la région la plus humide, avec une pluviométrie moyenne autour de 2000 mm/an, et la toute la façade ouest, excepté le sud-ouest, reçoit deux fois moins de pluies. Les résultats ont aussi montré une alternance de période, sèche et humide pendant la période récente. Ainsi, une période sèche a été identifiée autour des années 1980-1990 et une période humide a été identifiée à partir des années 2000. Ces périodes sèches et humides ont été aussi identifiées à l'échelle caribéenne par Taylor *et al.* (2002).

Comme pour la période historique, des différences significatives ont été observées entre les valeurs de pluies et de débits prédéterminées par les différentes méthodes. Néanmoins, les débits utilisés sont des débits simulés obtenus avec des paramètres obtenus après calage sur la période historique, ce qui est une hypothèse forte. En effet, Haïti a connu ces dernières décennies une déforestation massive (Hedges *et al.*, 2018 ; Tarter *et al.*, 2018 ; White & Runge, 1994) où 30% de ces terres ont été dégradées de manière irréversible (Gardi *et al.*, 2014). En plus de cette déforestation massive, l'extension des villes haïtiennes, souvent de manière anarchique (Maurice, 2014), impacte grandement la perméabilité des sols (Hibbs & Sharp, 2012). Or la déforestation et l'urbanisation sont connues pour augmenter les débits de pointe pendant la saison des pluies ; et diminuer le débit de base pendant la saison sèche (Bruijnzeel, 2004 ; Marhaento *et al.*, 2017 ; Sahin & Hall, 1996 ; Ren *et al.*, 2020). Ainsi, les débits simulés sur la période récente avec les données de pluies MSWEP et les paramètres "historiques" peuvent ne pas être représentatifs des débits réellement observés sur le terrain.

9.4 Comparaison des deux périodes étudiées

Les deux périodes étudiées ont été comparées et les résultats obtenus ont montré que la période historique semble être plus humide que la période récente. Cette tendance a aussi été observée avec la base de données de pluies mensuelles constituées par Moron *et al.* (2015). Cependant, la base de données de Moron *et al.* (2015) est lacunaire et les ruptures dans la disponibilité des données peuvent influencer les résultats obtenus. Cette analyse a donc été complétée avec des données de pluies de la réanalyse 20CR de la NOAA (Slivinski *et al.*, 2019). Les résultats obtenus avec la réanalyse 20CR montrent qu'à l'inverse, la période récente a été plus humide que la période historique. Cependant, les données 20CR ne sont pas des données observées mais des données issues d'une réanalyse n'assimilant pas de données de pluies et n'étant disponible que sur des grosses mailles (une maille 20CR représente environ 45% de la superficie d'Haïti). Ainsi, cette analyse ne permet pas de conclure si la période historique a été effectivement plus humide ou si les différences observées sur les deux périodes sont liées aux différences entre les bases de données utilisées.

Les résultats obtenus pour les bassins versants haïtiens ont été comparés à ceux obtenus pour des bassins versants dans les grandes Antilles dans le but d'évaluer la cohérence de l'hydrologie haïtienne à l'échelle régionale. Les résultats des comparaisons des pluies et des débits dans les Grandes Antilles ont montré que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeurs et sont cohérents à l'échelle régionale. Une alternance de période sèche (entre 1980 et 2000) et humide (à partir des années 2000) a été identifiée à la fois dans les pluies et les débits des bassins versants régionaux. Cette alternance de période humide et sèche à l'échelle régionale, cohérent avec les résultats de Taylor *et al.* (2002).

9.5 Apports du travail de thèse

Les apports de cette thèse peuvent être présentés en trois grands points :

1. cette thèse a permis d'avoir une base de données hydro-climatiques historiques (1920-1940) en Haïti. Cette base de données a permis de valoriser des données hydro-climatiques Haïti qui jusque-là étaient inexploitées. De plus, cette base de données a permis de caractériser 24 bassins versants à partir d'indices et signatures hydrologiques qui peuvent être utilisés par la communauté scientifique ou les bureaux d'études.
2. En raison du manque de données hydro-climatiques de référence en Haïti, des estimations satellitaires ont souvent été utilisées sans même évaluer leurs performances, ce qui peut conduire à des résultats erronés. Il a de thèse a permis d'évaluer la performance de plusieurs produits de maillées à l'échelle des Antilles. Ce travail a permis de mettre en lumière les avantages et les inconvénients de chaque produit de pluies maillées, et ainsi guider les utilisateurs sur le choix du produit de pluies à utiliser.
3. Jusqu'à date, très peu d'études n'avaient été réalisées sur l'hydrologie des bassins versants haïtiens, et aucune sur les pluies et crues fortes. Ce type d'étude est pourtant essentielle pour une meilleure compréhension des aléas hydrométéorologiques en Haïti. Cette thèse a permis de caractériser les événements marquants en Haïti tels que les cyclones et les pluies intenses "hors cyclones". Ensuite, les cumuls, durées et évolution spatio-temporelle des épisodes de fortes pluies ont été caractérisés. Enfin, des ordres de grandeurs des pluies et crues fortes ont été estimés pour l'ensemble du territoire couvert par un bassin versant jaugé, et ceci pour différentes périodes de retour et différentes méthodes. Une estimation qualitative de l'incertitude autour de ces valeurs a également été réalisée. Ces ordres de grandeurs peuvent désormais être considérés pour définir des seuils de pluies et débits en Haïti.

En somme, cette thèse constitue la première étude détaillée sur l'hydrologie haïtienne et a permis de décrire le fonctionnement des bassins versants jaugés lors de pluies et crues fortes.

9.6 Perspectives

9.6.1 Numérisation des archives papiers

L'une des perspectives de cette thèse est la numérisation des archives historiques après 1940. En effet, seules les données sur la période 1920-1940 ont été numérisées dans ce travail de thèse. Une perspective intéressante pourrait être de continuer avec ce travail de numérisation afin d'alimenter la base de données Simbi. Cela permettrait de disposer de données hydro-climatiques sur une plus longue période, et contribuerait à une meilleure compréhension de l'hydrologie en Haïti.

9.6.2 Renforcement du réseau d'observations hydrométéorologiques

La problématique de la disponibilité des données hydrométéorologiques a été discutée tout au long de cette thèse. Ainsi, une perspective intéressante est de renforcer le réseau d'observations hydrométéorologiques en

Haïti. Un projet pilote nommé RECICAMET¹ (REseau CItoyen de CApteurs hydroMETéorologiques), porté par l'URGéo et financé par le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) et le FAR (Fond d'Appui à la Recherche) de l'UEH, est en cours de réalisation. Ce projet consiste à instrumenter le bassin versant des Cayes dans le sud d'Haïti en installant quatre stations météorologiques. Ces stations ont été installées principalement dans les écoles afin d'initier les élèves et les étudiants aux risques hydrométéorologiques en Haïti.

Cette approche de science participative a été inspirée du projet *ayiti seisme*² (Calais *et al.*, 2020) qui a consisté à la mise en place d'un réseau de sismologie citoyenne (sismomètre installé chez les particuliers). Ce réseau de sismologie citoyenne a d'ailleurs permis de mieux étudier le séisme du 14 août 2021 (Calais *et al.*, 2022a; Courboulex *et al.*, 2021).

9.6.3 Amélioration de l'analyse fréquentielle des pluies et des débits

Des méthodes statistiques classiques (Gumbel, GEV et Gradex) ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle des pluies et des débits car ces méthodes sont simples d'utilisation et nécessitent peu de données en entrée. Elles sont donc adaptées aux contextes haïtiens. Cependant, d'autres méthodes ont été développées ces dernières décennies en exploitant la structure spatiale des données de pluies maillées. Par exemple, la méthode SST (Transposition Stochastique des Tempêtes) développée par Wright *et al.* (2013), et utilisée dans plusieurs pays (Wright *et al.*, 2017, 2020b; Wright *et al.*, 2020a), permet de réaliser une analyse fréquentielle des pluies en ré-échantillonnant les épisodes de pluies les plus fortes identifiés dans une base de données de pluies maillées (radar, satellite ou réanalyse). Cette méthode a été appliquée sur un bassin versant en Haïti et un bassin versant en République Dominicaine (Bathelemy *et al.*, 2021) en utilisant les données de pluies maillées MSWEP. Les résultats obtenus ont montré que les valeurs de pluies obtenues avec la méthode SST étaient cohérentes avec celles obtenues avec les méthodes classiques (Gumbel et GEV). De ce fait, la méthode SST a été testée à l'échelle régionale sur des bassins versants en Jamaïque et à Porto Rico et les résultats ont montré que la méthode SST sous-estime les valeurs de pluies, notamment pour les bassins versants à Porto Rico. Du fait de ces limites importantes, les résultats obtenus par cette méthode n'ont pas été présentés dans cette thèse. Néanmoins, une perspective intéressante pourrait être d'utiliser la méthode SST sur un échantillon de bassins versants plus large et d'évaluer la performance de cette méthode à l'échelle des Antilles. D'autres méthodes de simulation stochastique de crues comme la méthode SCHADEX (Paquet *et al.*, 2013) pourraient également être testées.

De plus, les résultats de cette thèse ont montré qu'il y a une forte incertitude liée au choix de la méthode utilisées, aux données utilisées (estimées par satellite, simulées ou observées) et à la période de disponibilité des données. Ainsi, une perspective intéressante serait de quantifier les différentes sources d'incertitudes, en utilisant des méthodes de échantillonnage comme le bootstrap par exemple.

9.6.4 Pertinence des séries de débits historiques

Les seules séries de débits existantes en Haïti sont disponibles sur la période 1920-1940. Ces séries de débits ont été utilisées pour étudier l'hydrologie des bassins versants haïtiens sur cette période historique. De plus, des paramètres du modèle pluie-débit GR4J obtenus par calage sur cette période historique ont été utilisés pour simuler des séries de débits sur la période 1979-2017. Ces débits simulés ont été utilisés pour étudier l'hydrologie en Haïti sur cette période récente (1979-2017). L'utilisation des paramètres calés sur la période historique pour simuler des débits sur la période récente est une hypothèse forte. En effet, des changements liés à l'évolution du climat, à la déforestation massive et l'urbanisation anarchique en Haïti pourraient modifier considérablement les comportements hydrologiques des bassins versants haïtiens. Ainsi, une perspective intéressante serait d'évaluer l'impact de l'évolution du climat et de l'occupation du sol sur le comportement hydrologique des bassins versants haïtiens, puis, d'évaluer la pertinence des séries de débits historiques pour la compréhension de l'hydrologie sur une période plus récente.

1. <http://recicamet.fds.edu.ht/>, consulté le 15 octobre 2023.

2. <https://ayiti.unice.fr/ayiti-seismes/>, consulté le 22 octobre 2023.

9.6.5 Cartographie des inondations

Le peu de données hydro-climatiques disponibles en Haïti rendent difficile l'utilisation des modèles d'inondations basés sur les équations de l'hydraulique. Néanmoins, des modèles d'inondations simplifiés, tels que MHYST (Rebolho, 2018), Geoflood (Zheng *et al.*, 2018), Exzeco (Pons *et al.*, 2010) et HAND (Nobre *et al.*, 2016) pourraient être utilisés. Ces méthodes sont basées le plus souvent sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain et d'un modèle hydraulique "simple" permettant de transformer les débits en hauteurs d'eau afin d'estimer les emprises d'inondations. Ainsi, les débits prédéterminés dans le cadre de cette thèse pourraient être utilisés afin de cartographier les emprises d'inondations pour les crues de période de retour de 10, 50 et 100 ans.

9.6.6 Autres perspectives

Trois autres perspectives sont présentées ci-dessous :

1. les valeurs de pluies et de débits prédéterminées obtenues dans cette thèse pourraient être utilisées afin d'avoir des seuils d'alerte, qui par la suite, pourraient être utilisés dans les systèmes de prévision des crues.
2. des données et analyses produites dans cette thèse pourraient être la base d'un travail complémentaire de cartographie de la ressource en eau (Emmanuel & Vermande, 2002 ; Emmanuel & Lindskog, 2002) et de l'aléa sécheresse en Haïti.
3. les résultats de cette thèse ont été obtenus pour des bassins jaugés. Une perspective intéressante pourrait être de transférer les résultats obtenus sur des bassins versants non-jaugés afin d'avoir des estimations des valeurs de crues sur l'ensemble du territoire.

Annexe A

Liste des annexes

A.1 Language de programmation et bibliothèques utilisées

Le langage de programmation R (R Core Team, 2022) a été utilisé dans cette thèse. En plus des bibliothèques de base, celles-ci ont aussi été utilisées :

- La bibliothèque airGR (Coron *et al.*, 2017; Coron *et al.*, 2023) a été utilisée pour la modélisation hydrologique.
- Les bibliothèques raster (Hijmans *et al.*, 2023a), sf (Pebesma, 2018; Pebesma & Bivand, 2023), terra (Hijmans *et al.*, 2023b), deldir (Turner, 2023), rnaturalearth (Massicotte *et al.*, 2023), rnaturalearth-data (South, 2017), rnaturalearthhires (South & Michael, 2024) et geometry (Roussel *et al.*, 2023) ont été utilisées pour la géomatique.
- Les bibliothèques tidyverse (Wickham *et al.*, 2019), lubridate (Grolemund & Wickham, 2011), ncd4 (Pierce, 2023), openxlsx (Schauberger *et al.*, 2023), R.utils (Bengtsson, 2023), curl (Ooms, 2023) et readxl (Wickham *et al.*, 2023b) ont été utilisées pour la manipulation des données.
- Les bibliothèques ggplot2 (Wickham *et al.*, 2023a), ggspatial (Dunnington *et al.*, 2023), ggpubr (Kasambara, 2023), plotly (Sievert, 2019), cowplot (Wilke, 2023) et ggrepel (Slowikowski *et al.*, 2024) ont été utilisées pour la représentation graphique.
- Les bibliothèques evd (Stephenson & Ferro, 2022), extRemes (Gilleland & Katz, 2016), fExtremes (Wuertz *et al.*, 2023) et qrmtools (Hofert *et al.*, 2022) ont été utilisées pour les analyses statistiques.
- La bibliothèque rmarkdown (Xie *et al.*, 2023a, b; Allaire *et al.*, 2023) a été utilisée pour la rédaction du manuscrit de thèse.

A.2 Annexe de l'article soumis à ESSD

A.2.1 Vérification de la numérisation

Verification of the two rainfall databases used was performed by comparing the monthly totals of the digitized daily rainfall series with the monthly rainfall database created by Moron *et al.* (2015). For months where the monthly totals of the two databases differed, a re-verification of the digitized daily rainfall series was carried out, which improved the quality of the digitized daily rainfall data. For some months and stations, the rainfall data produced by Moron *et al.* were erroneous. The errors in the Moron data are generally of five types :

1. A data entry error during the digitization of this monthly data.
2. Data from some months are confused with data from another station with similar names (e.g., St. Louis du Nord and St. Louis du Sud, Verrettes and Fonds Verrettes), which are often not geographically close.

3. Elimination of some extreme values, thinking that they were input errors. For example, the rainfall was in fact 1196.9 mm at Camp-Perrin (P-136) in October 1933, but the Moron et al. database stated 196.9 mm.
4. Error in calculating monthly totals. In fact, at the end of each month, the monthly rainfall totals were calculated by the raingauge managers, and sometimes there were errors in calculating the monthly totals. However, it is these monthly totals that were used to create the Moron *et al.* (2015) data.
5. Mixing of data from stations located in the same city. Initially, all the raingauges were managed by the observatory of the Petit Séminaire Collège St. Martial, and these raingauges were named after the town in which they were installed. Around 1928, public works began to install stations in the same towns as the first stations. This sometimes led to confusion between neighboring stations. For example, the 1920–1930 data for the Hinche station (P-065) are from the observatory station, and the 1931–1940 data are from the public works station. To avoid confusion, only the observatory stations were used in our study because they are more numerous and contain the longest data series.

After this verification process, the corrected Moron et al. database and digitized daily data were used in this study.

A.2.2 Structures des modèles pluie-débit conceptuels GR2M et GR4J

GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) is a monthly lumped rainfall–runoff model. Its structure (see figure A.1) combines a production store and a routing store to simulate the hydrological behavior of the catchment. The model has two parameters to optimize during calibration :

1. X1 : the production store maximal capacity [mm],
2. X2 : the catchment water exchange coefficient [-],

GR4J (Perrin *et al.*, 2003) is a daily lumped rainfall–runoff model. Its structure (see figure A.1) combines a production store and a routing store and unit to simulate the hydrological behavior of the catchment. The model has four parameters to optimize during calibration :

1. X1 : the production store maximal capacity [mm],
2. X2 : the catchment water exchange coefficient [mm/day],
3. X3 : the 1-day maximal capacity of the routing store [mm],
4. X4 : the HU1 unit hydrograph time base [days].

A.2.3 Liste des attributs et signatures hydrologiques

TABLEAU A.1 – Summary of the number of raingauges used to calculate reference rainfall, the number of combinations of these raingauges, and the most important raingauges for hydrological modeling.

Catchment name	Catchment area [km ²]	Catchment code	Number of reference raingauges	Number of combinations without gaps	Relevant raingauges
AMONT DU BASSIN - RIVIERE GRISE	274.33	Q-001	7	110	P-091 P-104 P-095 P-118
ARCAHAIE - RIVIERE MATHIEUX	65.65	Q-004	7	92	P-056 P-057 P-059

table continued on next page

Table A.1 – continued from previous page

Catchment name	Catchment area [km ²]	Catchment code	Number of reference raingauges	Number of combinations without gaps	Relevant rain-gauges
BASSIN PROBY - RIVIERE COUJOL	78.73	Q-006	6	44	P-054 P-056 P-057 P-059 P-087 P-108
BUISSONNIERE - RIVIERE MORMANCE	239.68	Q-007	7	118	P-091 P-114 P-118
CAMP PERRIN - RIVIERE RAVINE DU SUD	65.73	Q-008	5	8	P-116 P-135 P-136 P-150 P-131
CAVAILLON - RIVIERE CAVAILLON	321.21	Q-010	6	39	P-136 P-143 P-150
GROS MORNE - RIVIERE TROIS-RIVIERES	272.6	Q-023	8	187	P-001 P-004 P-033 P-068 P-070
HINCHE - RIVIERE GUAYAMOUC	1966.9	Q-024	11	1022	P-075 P-017 P-056 P-059 P-068 P-069 P-070 P-054 P-033
LES CAYES - RIVIERE ISLET	100.77	Q-029	5	19	P-136 P-143 P-150
MESSAYE - RIVIERE TORCELLE	73	Q-036	7	88	P-054 P-087 P-093 P-100
MIREBALAIS - RIVIERE ARTIBONITE	7464.22	Q-037	11	1634	P-057 P-060 P-065 P-100 P-068 P-070 P-010 P-069 P-075
PONT-SONDE - RIVIERE ARTIBONITE	8604.47	Q-041	11	1648	P-056 P-060 P-065 P-066 P-100 P-057 P-069 P-075
PASSE FINE - RIVIERE LA THEME	304.04	Q-044	5	12	P-056 P-057 P-093 P-100 P-108
PASSE JOLY - RIVIERE D'ENNERY	192.13	Q-045	7	107	P-004 P-068 P-028 P-044 P-045 P-033
PLAISANCE - RIVIERE TROIS-RIVIERES	44.84	Q-051	6	43	P-004 P-068 P-070
PONT BENOIT - RIVIERE ESTERE	137.9	Q-052	8	185	P-057 P-059 P-068 P-056 P-066 P-075 P-053
table continued on next page					

Table A.1 – continued from previous page

Catchment name	Catchment area [km ²]	Catchment code	Number of reference raingauges	Number of combinations without gaps	Relevant rain-gauges
PONT CHRIS- TOPHE - RI- VIERE LIMBE	245.46	Q-053	8	187	P-004 P-009 P- 010 P-068 P-044
RIVIERE GRANDE RIV. DU NORD	547.75	Q-056	10	508	P-068 P-009 P- 017 P-025 P-027 P-065
PONT PETION - RIVIERE FER-A CHEVAL	479.04	Q-057	8	216	P-062 P-072 P- 104
PONT TOUS- SAINT - RI- VIERE MON- TROUIS	168.2	Q-058	10	950	P-028 P-056 P- 068 P-057 P-087
OUANAMINTHE - RIVIERE MAS- SAGRE	315.01	Q-060	4	8	P-057 P-068 P- 017
ROCHE HA- LEINE - RI- VIERE LIMBE	128.4	Q-061	8	187	P-004 P-033 P- 044 P-068 P-070 P-010 P-009
ST-RAPHAEL - RIVIERE BO- NYAHA	177.95	Q-065	8	126	P-004 P-009 P- 045 P-068 P-010 P-033
TORBECK - RIVIERE TOR- BECK	95.99	Q-068	4	9	P-136 P-143 P- 150
end of the table					

TABLEAU A.2 – List of catchment attributes used in this study.

Attribute class	Attribute name	Description	Unit
Location and topography	code	catchment identi- fier	-
	name	Catchment name	-
	Lon_Exu	Longitude of the catchment outlet	°W
	Lat_Exu	Latitude of the catchment outlet	°N
	Lon_Cent	Longitude of the catchment centroid	°W
	Lat_Cent	Latitude of the catchment centroid	°N
	Area	Catchment area	Km ²
	Gravelius	Gravelius coeffi- cient (catchment elongation)	-
	Min_Elev	Minimum catch- ment elevation	m
table continued on next page			

Table A.2 – continued from previous page

Attribute class	Attribute name	Description	Unit
	Max_elev	Maximum catchment elevation	m
	Sd_Elev	Standard deviation of catchment elevations	m
	Slope	Average slope of the catchment computed according to Horn (1981)	°
	Hypso_curve	cumulative frequency of catchment elevations	m
Geological characteristics	Lithology	Percentage of the catchment covered by each geologic class	%
	Carb_Rocks_Perc	Percentage of the catchment covered by carbonate sedimentary rocks	%
	Sedim_Perc	Percentage of the catchment covered by sedimentary rocks	%
	Magma_Perc	Percentage of the catchment covered by magmatic rocks	%
Aquifer characteristic	Aquifer	Percentage of the aquifer classes by each catchment	%
Land cover	Cover_95	Percentage of the catchment covered by each landcover class (1995)	%
	Cover_98	Percentage of the catchment covered by each landcover class (1998)	%
Climatic indices	Aridity	Aridity index : ratio between the rainfall and the potential evapotranspiration (PE)	-
	P_mean	Rainfall average	mm/month
	T_mean	Temperature average	°C
	PE_mean	PE average	mm/month
	P_5_month	Rainfall quantile 5%	mm/month
	T_5_month	Temperature quantile 5%	°C
table continued on next page			

Table A.2 – continued from previous page

Attribute class	Attribute name	Description	Unit
	PE_5_month	PE quantile 5%	mm/month
	P_95_month	Rainfall quantile 95%	mm/month
	T_95_month	Temperature quantile 95%	°C
	PE_95_month	PE quantile 95%	mm/month
	PMNA5	Yearly minimum of monthly rainfall not exceeded once in 5 years	mm/month
	PMXA10	Yearly maximum of monthly rainfall exceeded once in 10 years	mm/month
Hydrological signatures on a monthly time scale calculated with observed and 3 simulated streamflow	Runoff_Ratio	Runoff coefficient : ratio between the streamflow and the rainfall	-
	Q_mean_month	Mean monthly streamflow	mm/month
	Q_5_month	Streamflow quantile 5%	mm/month
	Q_95_month	Streamflow quantile 95%	mm/month
	QMNA5	Yearly minimum of monthly streamflow not exceeded once in 5 years	mm/month
	QMXA10	Yearly maximum of monthly streamflow exceeded once in 10 years	mm/month
	GR2M_param	the two parameters of GR2M	-
Hydrological signatures on daily time scale calculated with observed and 3 simulated streamflow	Q_mean_day	Mean daily streamflow	mm/d
	bfi	Baseflow index : ratio between the baseflow volume and the total streamflow volume (Pelletier & Andréassian, 2020)	-
	high_q_freq	Frequency of high-flow days (> 9 times the median daily flow)	d/yr
table continued on next page			

Table A.2 – continued from previous page

Attribute class	Attribute name	Description	Unit
	high_q_dur	Average duration of high-flow events (number of consecutive days > 9 times the median daily flow)	d
	low_q_freq	Frequency of low-flow days (< 0.2 times the mean daily flow)	d/yr
	low_q_dur	Average duration of low-flow events (number of consecutive days < 0.2 times the mean daily flow)	d
	Q_5_day	Streamflow quantile 5% (low flow)	mm/d
	Q_95_day	Streamflow quantile 5% (high flow)	mm/d
	GR4J_param	the four parameters of GR2M	
end of the table			

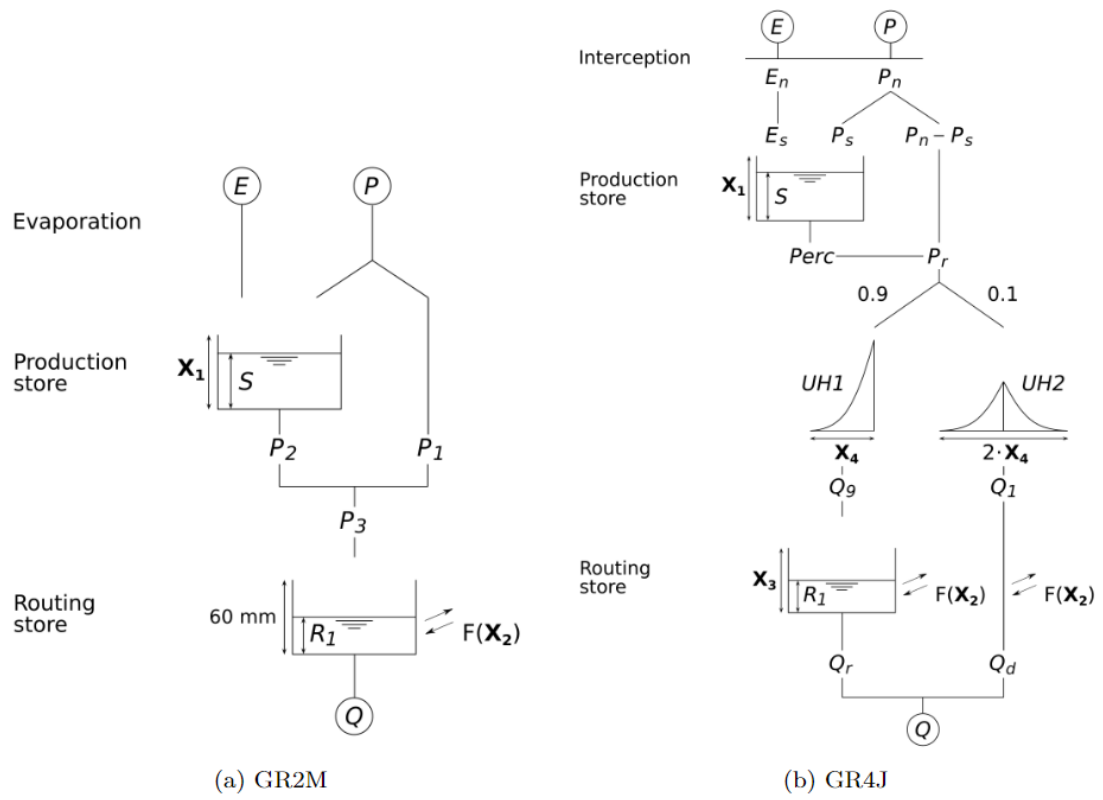


FIGURE A.1 – Diagram of GR2M and GR4J models (Mouelhi *et al.*, 2006 ; Perrin *et al.*, 2003).

TABLEAU A.3 – Types of lithology, aquifers, and land use.

lithology types	Alluvium, detrital materials
	Andesites and rhyodacites
	Basalt
	Diorite and tonalite
	Flysch, sandstone and limestone
	Hard limestone
	Marl and marly limestone
	Marl and sand
	Marly limestone
	Ultrabasic rocks
	Volcano-sedimentary rock
Acquifer types	Alluvial aquifers with free water
	Alluvial aquifers with partly confined water
	Carbonate aquifers with marl intercalation
	Crystalline formation
	Fissured and partitioned carbonate aquifers
	Highly permeable fissured and porous carbonate aquifers
	Karst aquifer
	Low permeability sedimentary formation
	More productive alluvial area
land use types in 1995	Closed Shrubland
	Cropland
	Deciduous Broadleaf Forest
	Deciduous Needleleaf Forest
	Evergreen Broadleaf Forest
	Evergreen Needleleaf Forest
	Grassland
	Mixed Forest
	Open Shrubland
	Urban
	Water
	Wooded Grassland
	Woodland
land use types in 1998	Beaches and dunes
	Continuous urban
	Dense agricultural crops
	Dense agroforestry systems
	Discontinuous urban
	Dominant pastures
	Forest
	Industrial areas
	Mangroves
	Medium-density agricultural crops
	Pasture with other presence
	Ports and airports
	Quarry
	River beds and recent alluvium
	Rock outcrops and bare soil
	Saline areas
	Savannahs
	Savannahs with other presence
	Water plan
Wetlands	

A.3 Annexes de l'article publié dans JOH:RS

A.3.1 Annexe de la comparaison des 5 produits de pluies satellitaires

TABLEAU A.4 – Summary of the selected satellite products.

Satellite product	Temporal resolution	Spatial Resolution	Period
PERSIANN-CDR	Daily	0.25°	1983-present
CHIRPS	Daily	0.05°	1981-present
MSWEP	3 hourly	0.10°	1979-2017
ERA-5	1 hourly	0.25°	1979-present
GPM IMERG	Half-hour	0.10°	2000 - present

TABLEAU A.5 – List of statistical metrics used to evaluate RGD performance. X_i represents rain gauge data, \bar{X} represents mean rain gauge data, Y_i represents RGD data, \bar{Y} represents mean RGD data, n represents the data length available, a represents rainfall detected both by the rain gauge and the RGD, b represents rainfall detected by the rain gauge but not by the RGD and c represents rainfall detected by the RGD but not by the rain gauge.

Statistical metrics	Units	Equations	Perfect Values
RMSE	mm/d	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}}$	0
R	-	$\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$	1
α	-	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$	1
β	-	$\frac{\bar{Y}}{\bar{X}}$	1
KGE	-	$1 - \sqrt{(1-r)^2 + (1-\alpha^2) + (1-\beta^2)}$	1
POD	-	$\frac{a}{a+b}$	1
FAR	-	$\frac{c}{a+c}$	0
CSI	-	$\frac{a}{a+b+c}$	1

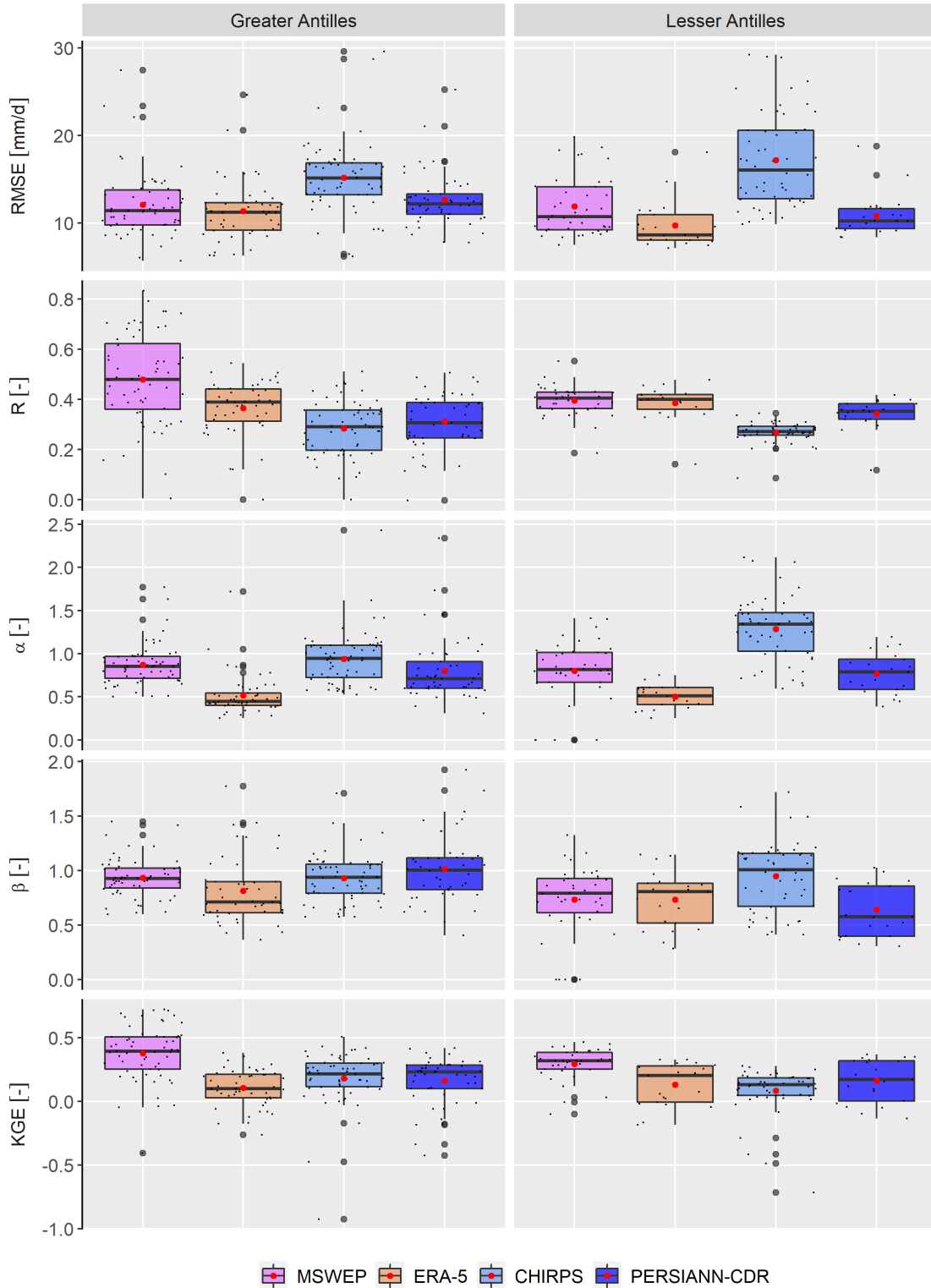


FIGURE A.2 – General performance of the RGD on a daily timescale via 5 statistical metrics in the Greater Antilles and Lesser Antilles. These boxplots offer a summary of the distribution of the scores calculated on each of the all 127 rain gauges : the center line indicates the median, the red point indicates the mean, the edges of the box are the 1st quartile and the 3rd quartile, the ends of the box define a threshold that cannot exceed 1.5.

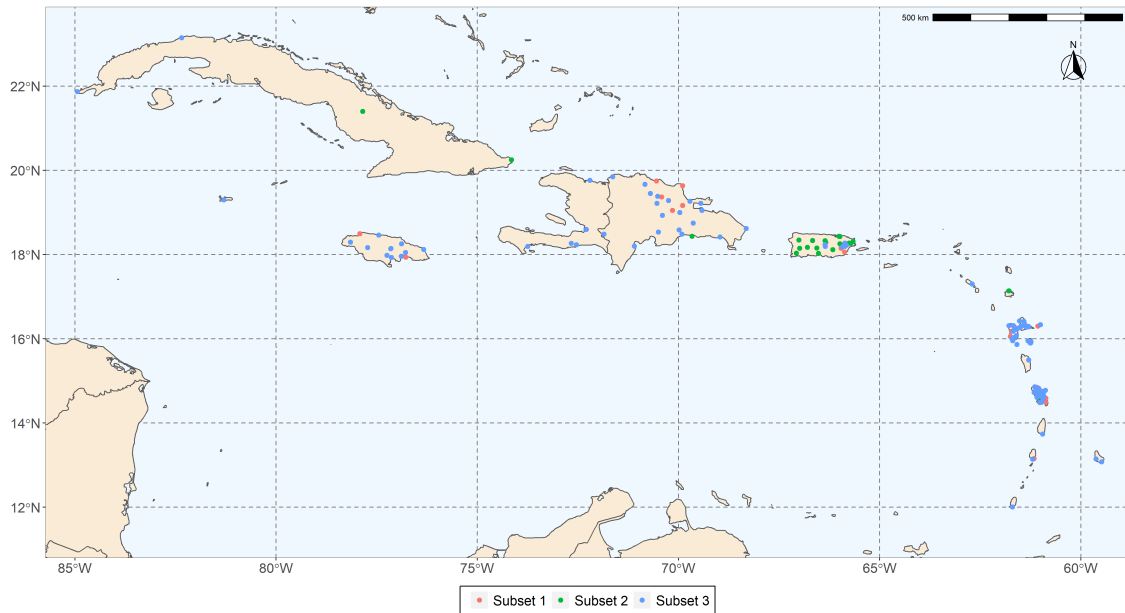


FIGURE A.3 – Position of the rain gauges constituting the three subsets : The first subset consists of 103 rain gauges excluding the 24 rain gauges used in MSWEP, the second subset (subset 2) consists of only the 24 rain gauges used in MSWEP, and the third subset consists of all the rain gauges (subset 1 + 2).

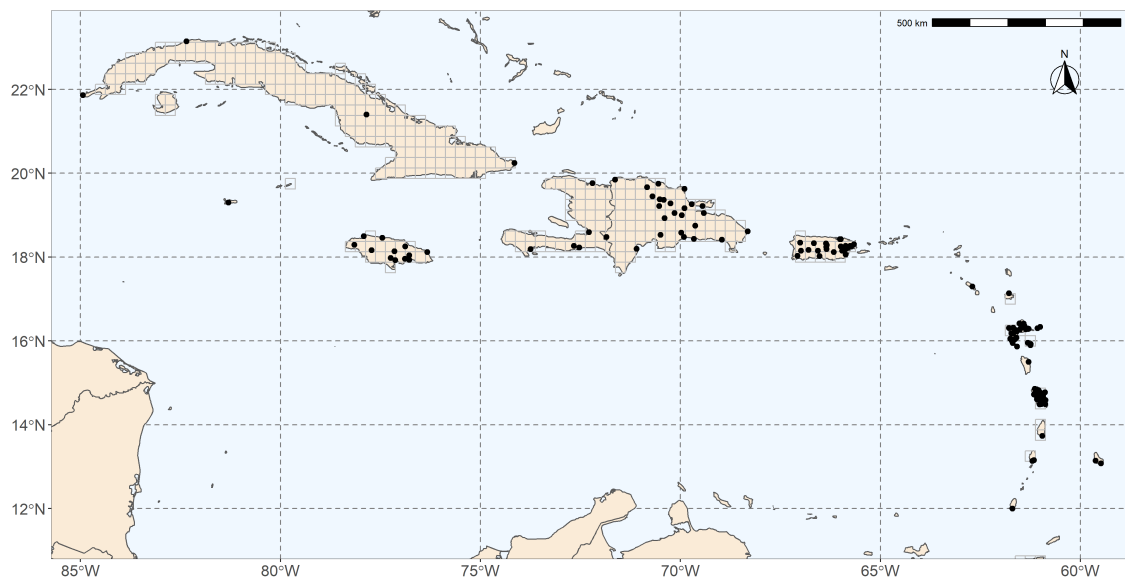


FIGURE A.4 – All the 127 rain gauges and the PERSIANN-CDR grid cells.

TABLEAU A.6 – Summary table of statistics (mean values, maximum values and standard deviation) of some rainfall percentiles in the Greater and Lesser Antilles. The expression tr symbolizes the rainfall as a trace.

Data base	test	5%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
Rain gauge	Mean	tr	tr	0.5	3.69	13	22	54
	max	tr	tr	4.33	12.9	29	42	92
	Standard deviation	tr	tr	0.9	2.66	6	8	13
MSWEP	Mean	0	tr	0.6	3.1	10	18	45
	max	0	tr	2.1	6.6	19	34	86
	Standard deviation	0	tr	0.5	1.7	4	7	17
ERA-5	Mean	tr	tr	1.5	3.4	8	11	23
	max	tr	tr	4.1	8.4	14	19	36
	Standard deviation	tr	tr	0.6	1.2	2	3	4
CHIRPS	Mean	0	0	0	1.8	14	26.3	65
	max	0	0	0	8.1	3	57	138
	Standard deviation	0	0	0	2.6	5	10	24
PERSIANN-CDR	Mean	0	0	0.2	3.4	10	18	40
	max	0	0	1.4	7.7	17	27	55
	Standard deviation	0	0	0.3	1.9	3	4	7

A.4 Cumuls de pluies associés aux évènements marquants listés par le BRGM

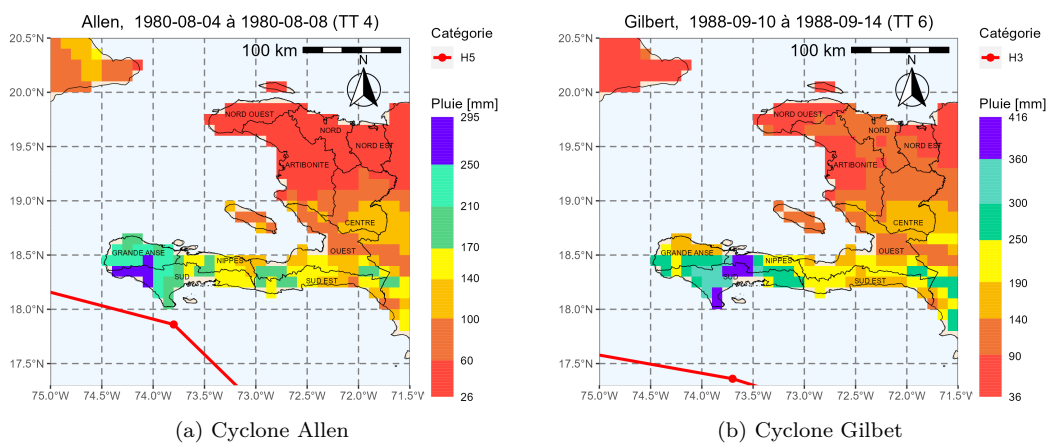


FIGURE A.5 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Allen et Gilbert.

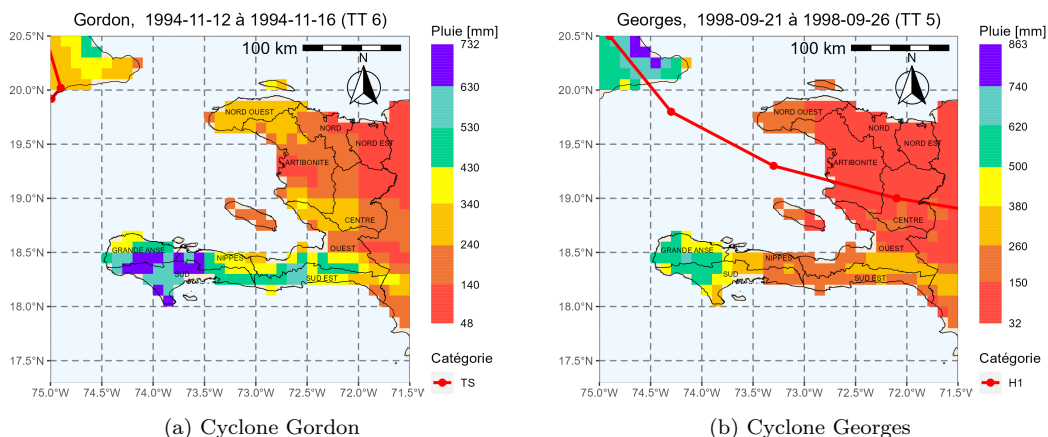


FIGURE A.6 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Gordon et Georges.

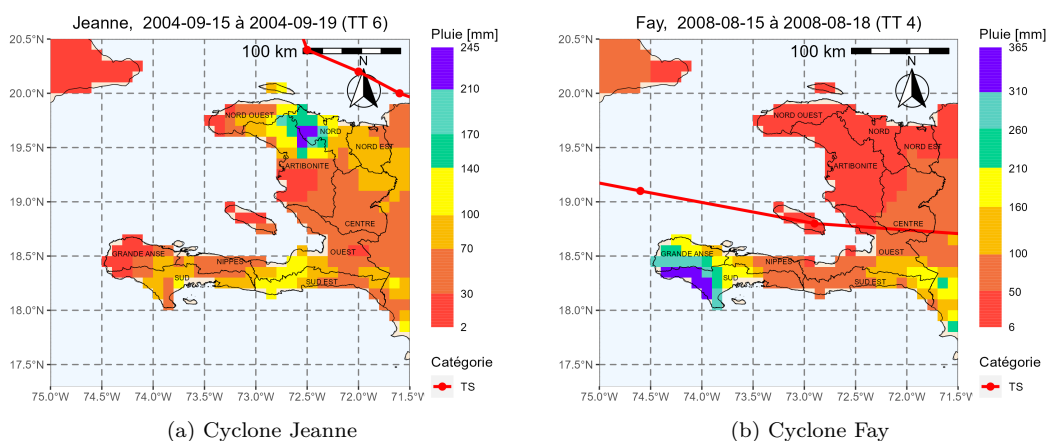


FIGURE A.7 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Jeanne et Fay.

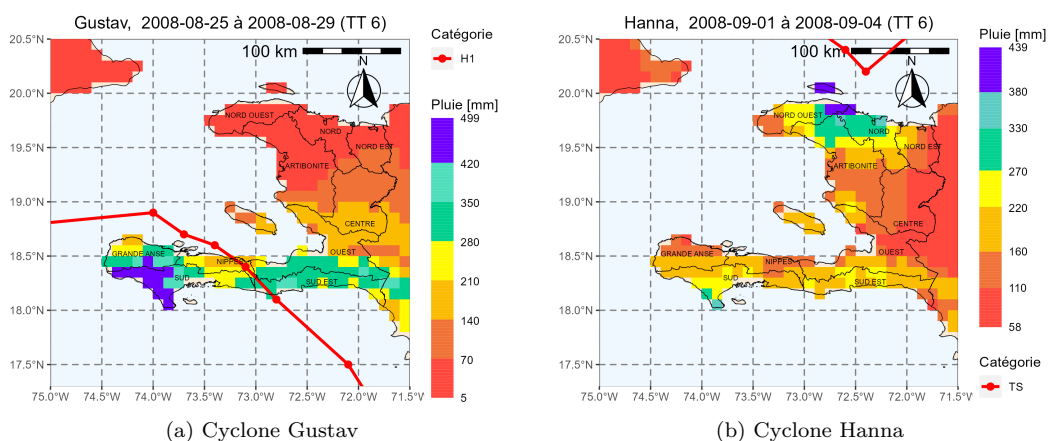


FIGURE A.8 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Gustav et Hanna.

A.4. CUMULS DE PLUIES ASSOCIÉS AUX ÉVÈNEMENTS MARQUANTS LISTÉS PAR LE BRGM

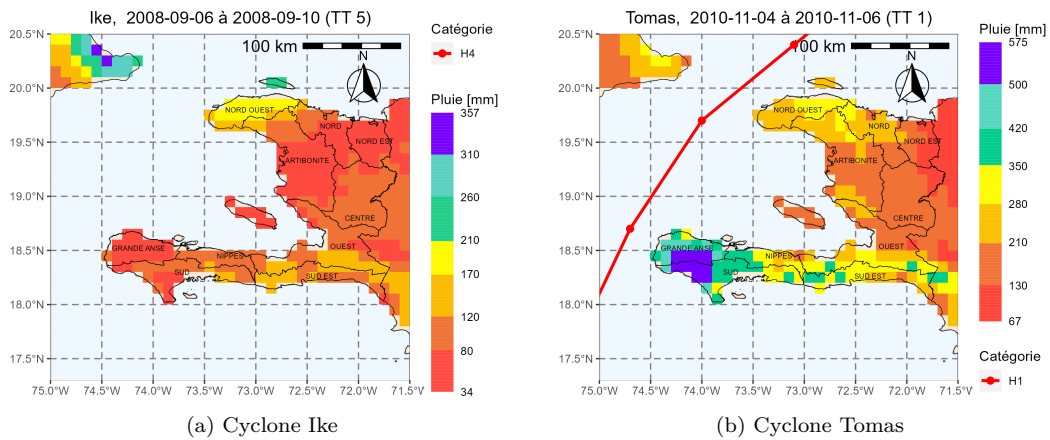


FIGURE A.9 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Ike et Tomas.

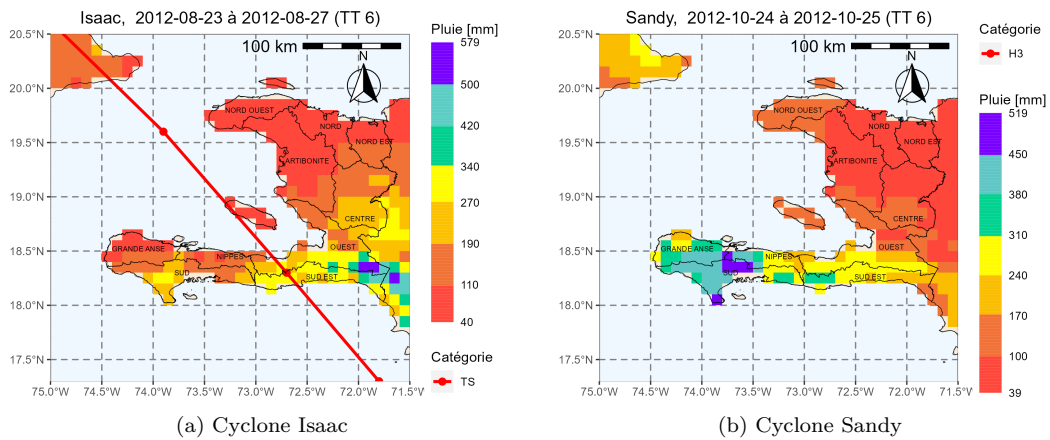


FIGURE A.10 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les cyclones Isaac et Sandy.

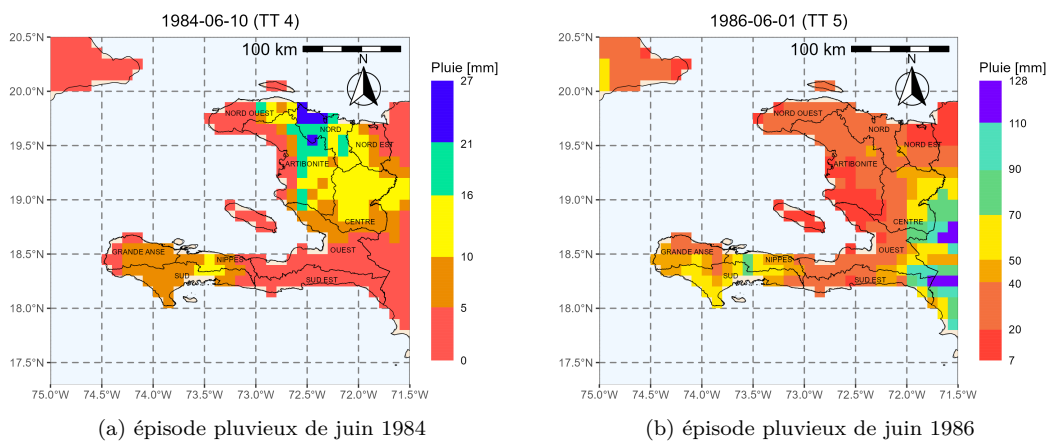


FIGURE A.11 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de juin 1984 et de juin 1986.

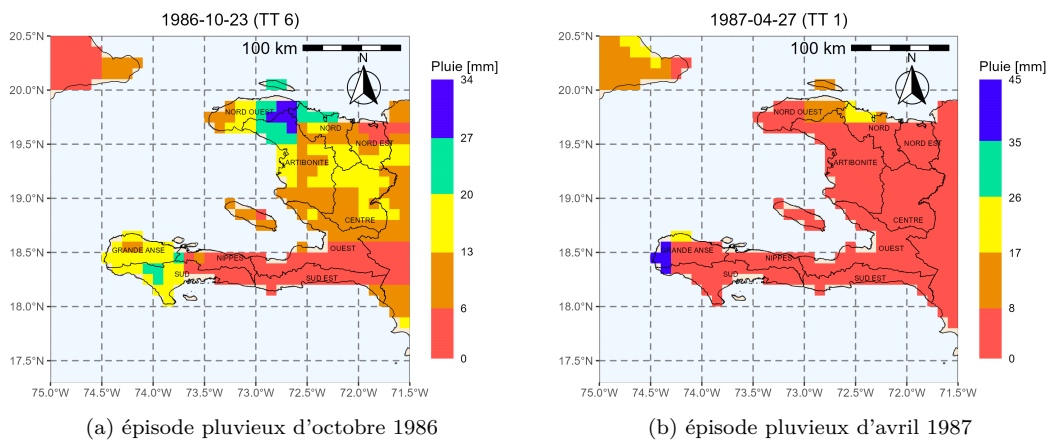


FIGURE A.12 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux d'octobre 1986 et d'avril juin 1987.

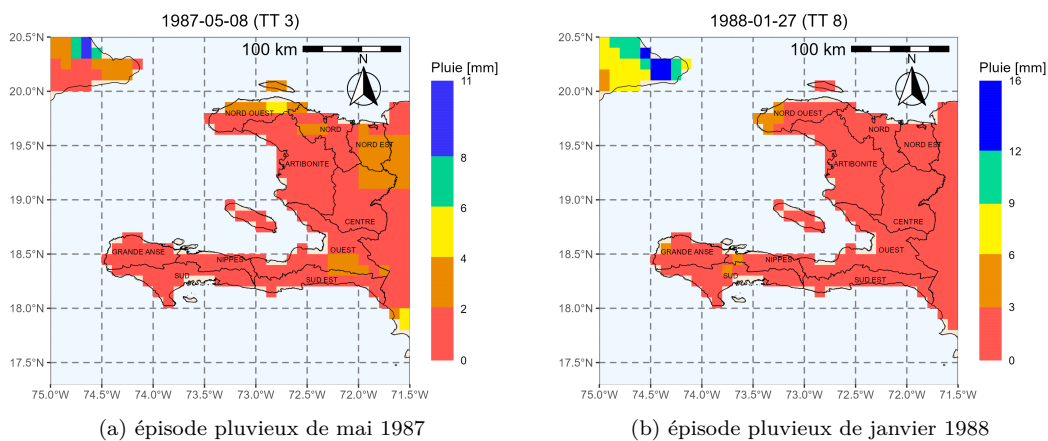


FIGURE A.13 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de mai 1987 et de janvier 1988.

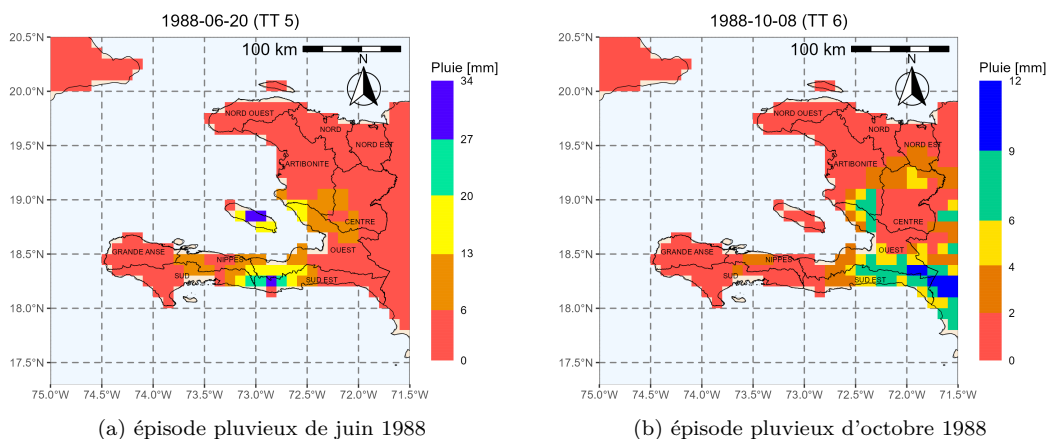


FIGURE A.14 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de juin 1988 et d'octobre 1988.

A.4. CUMULS DE PLUIES ASSOCIÉS AUX ÉVÈNEMENTS MARQUANTS LISTÉS PAR LE BRGM

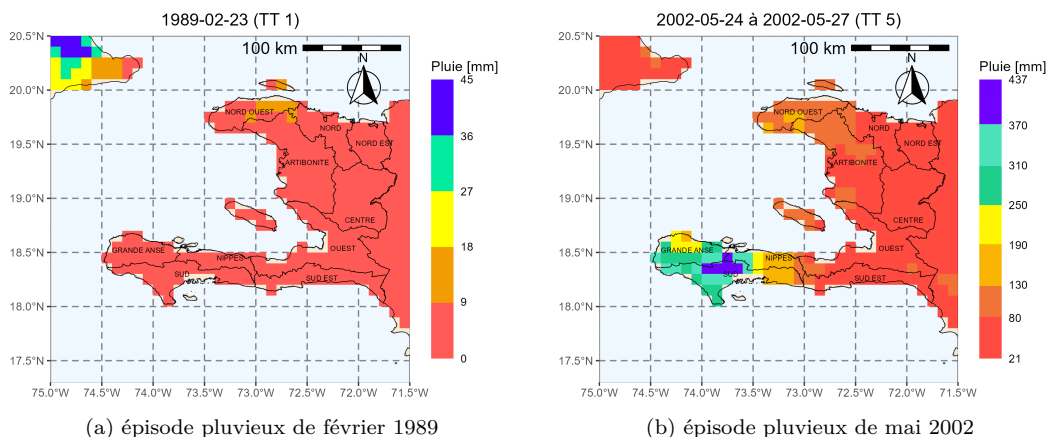


FIGURE A.15 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de février 1889 et de mai 2002.

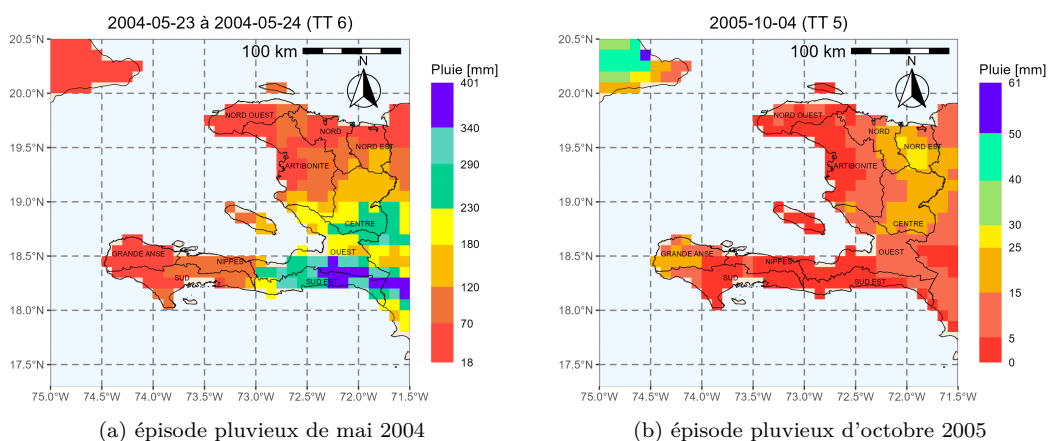


FIGURE A.16 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de mai 2004 et d'octobre 2005.

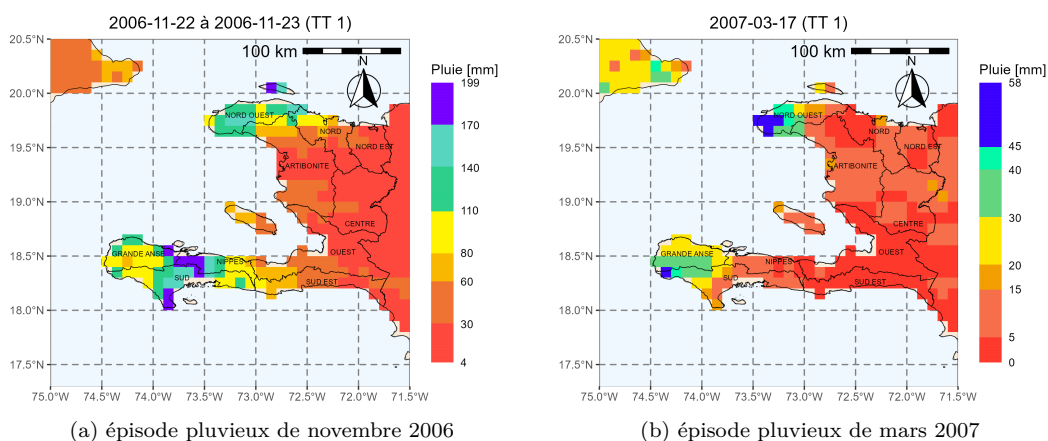


FIGURE A.17 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de novembre 2006 et de mars 2007.

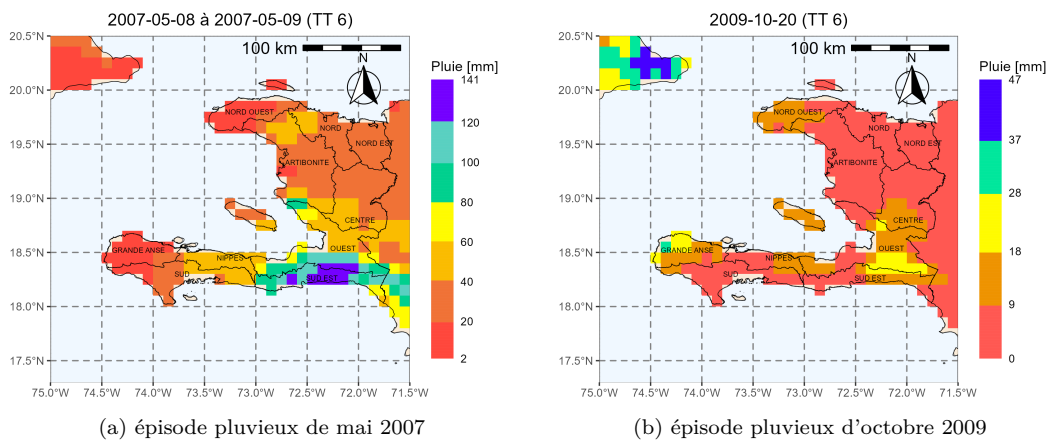


FIGURE A.18 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de mai 2007 et d'octobre 2009.

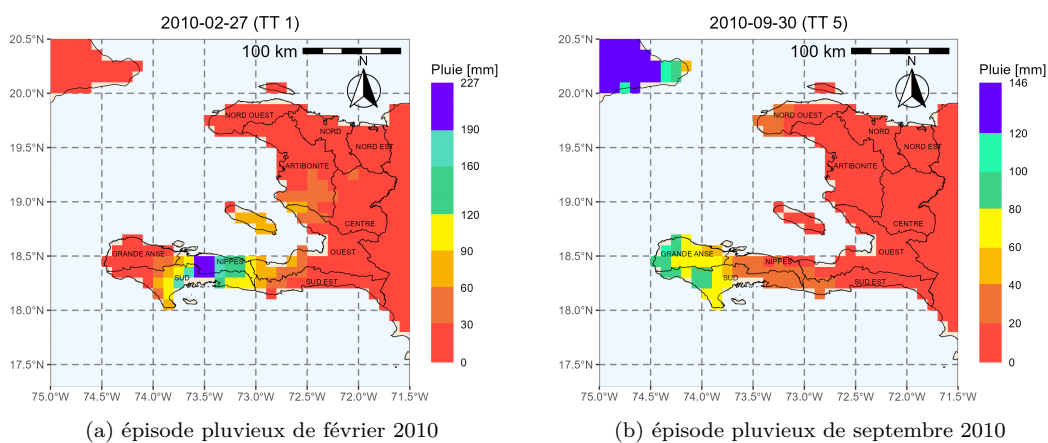


FIGURE A.19 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de février 2010 et de septembre 2010.

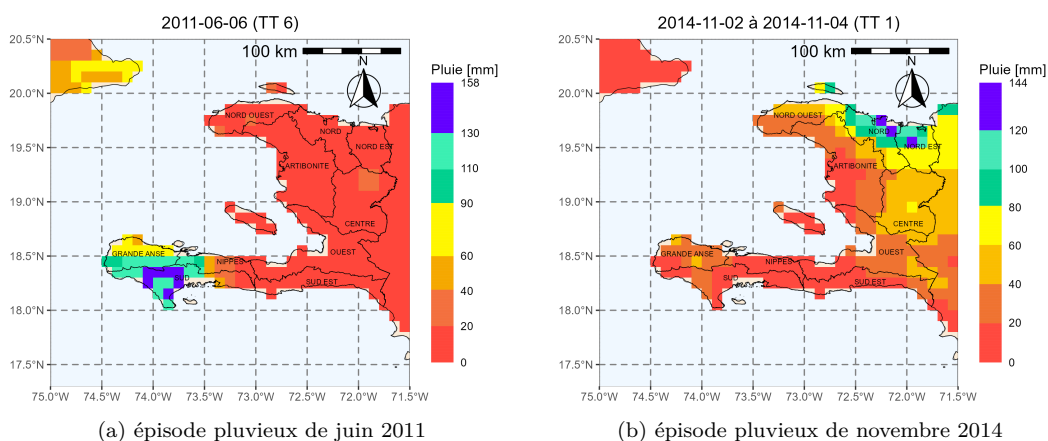


FIGURE A.20 – Cartographie des cumuls de pluies, calculés avec la base de données MSWEP, pendant les épisodes pluvieux de juin 2011 et de novembre 2014.

A.5 Prédétermination des débits des bassins versants haïtiens

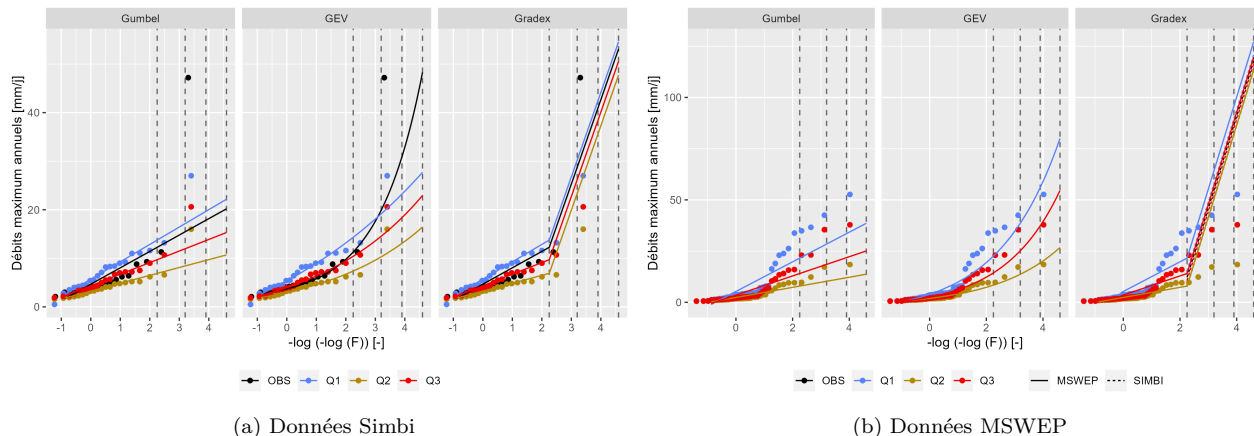


FIGURE A.21 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés du bassin versant Q-001, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

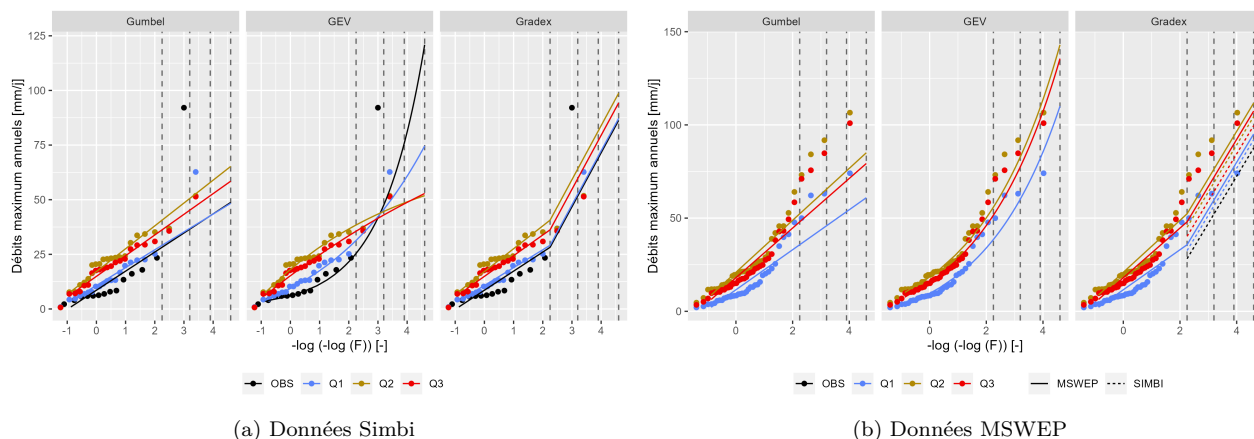


FIGURE A.22 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-004, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

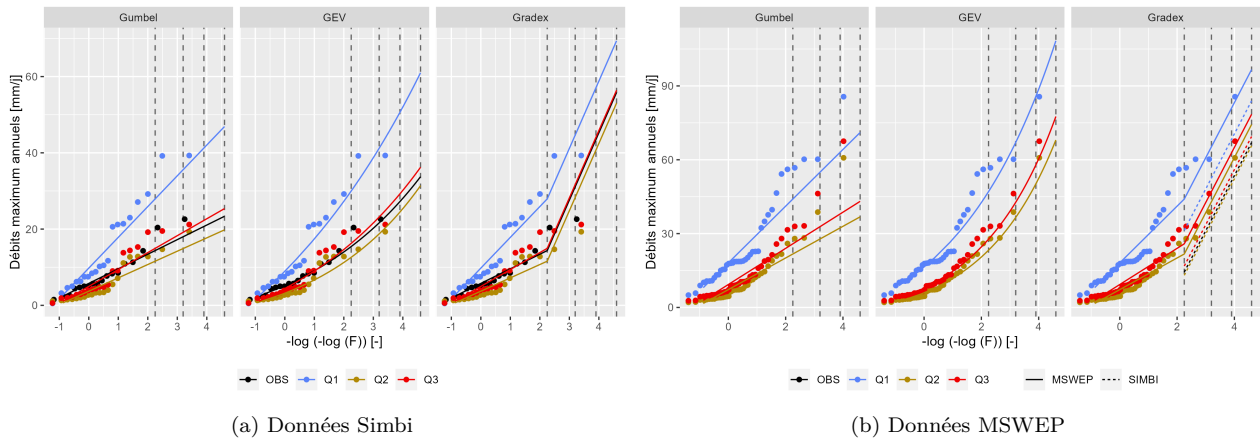


FIGURE A.23 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-006, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

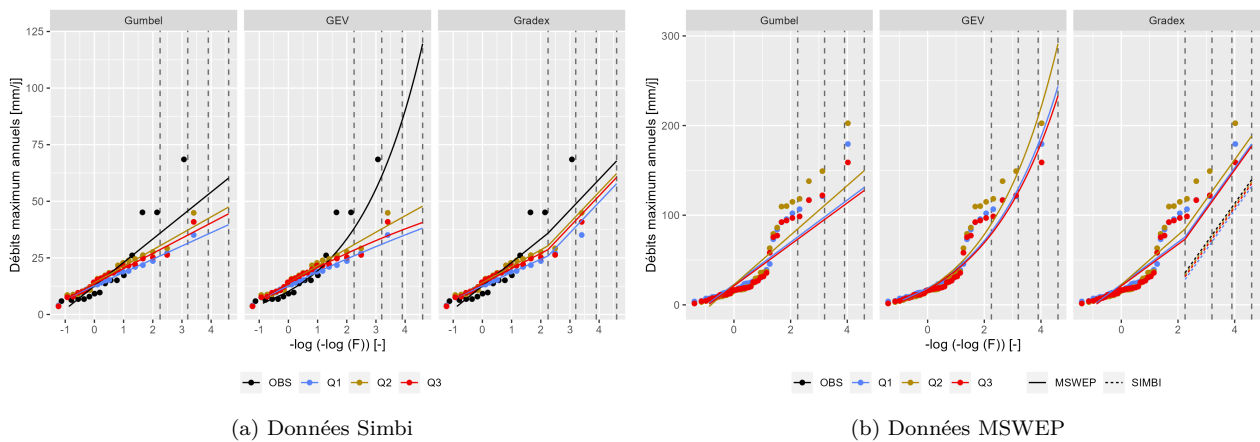


FIGURE A.24 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-007, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

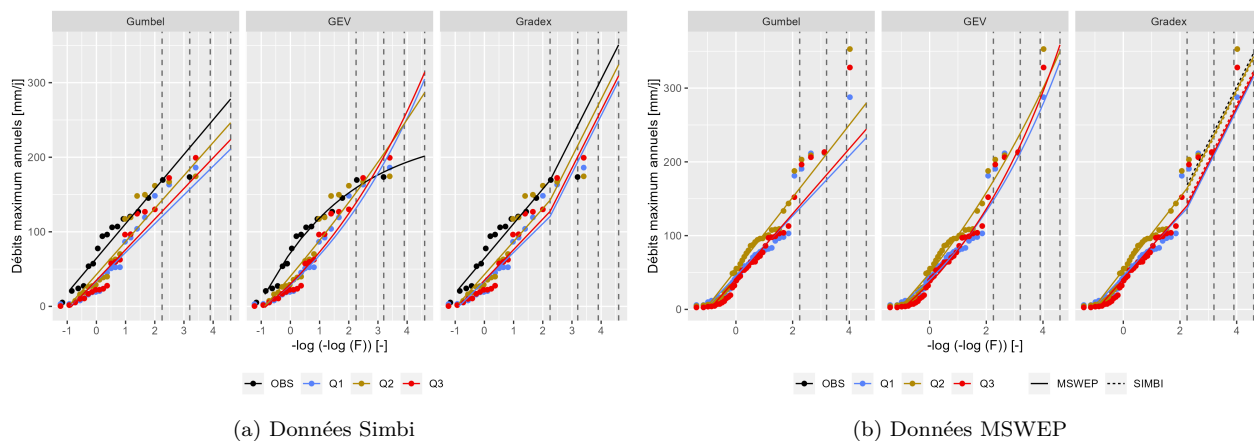


FIGURE A.25 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-010, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

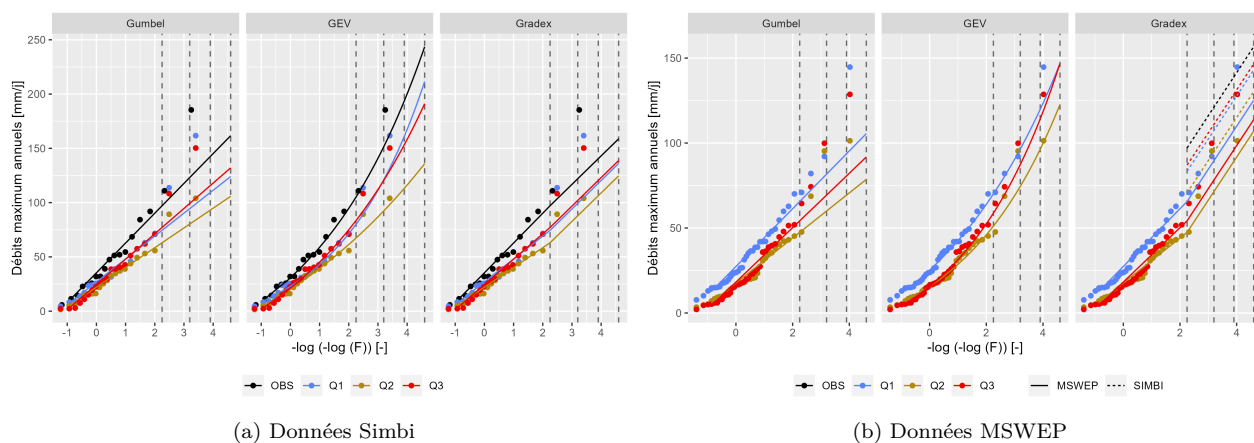


FIGURE A.26 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-023, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

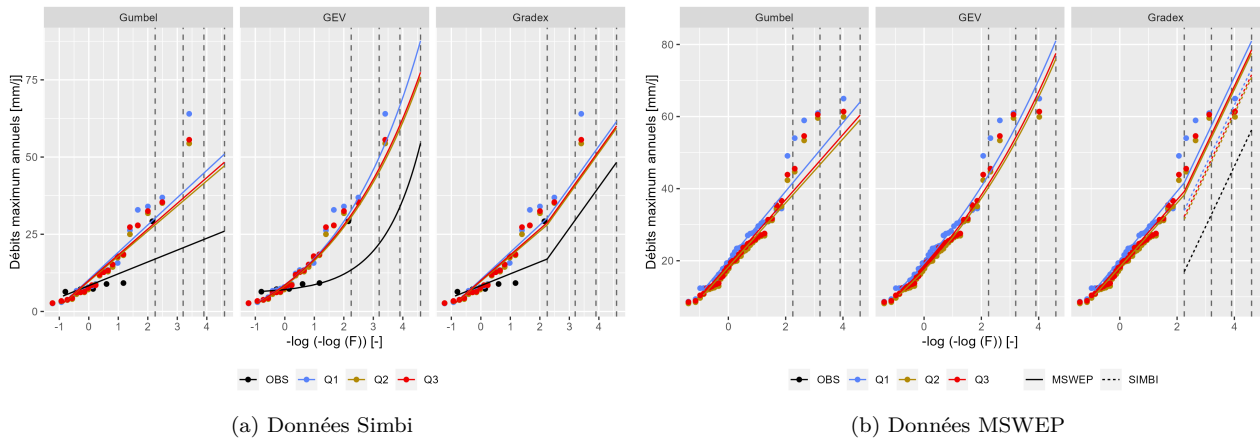


FIGURE A.27 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-024, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

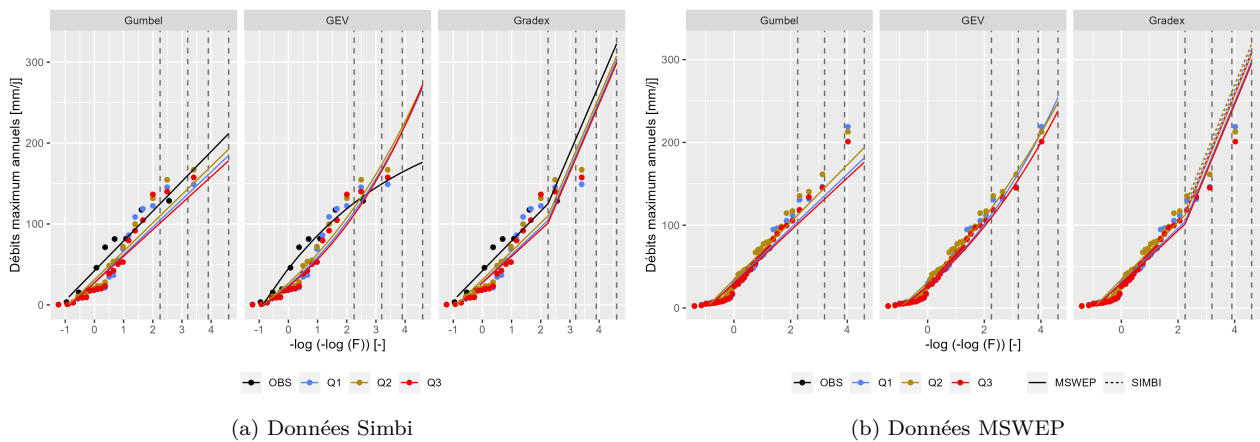


FIGURE A.28 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-029, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

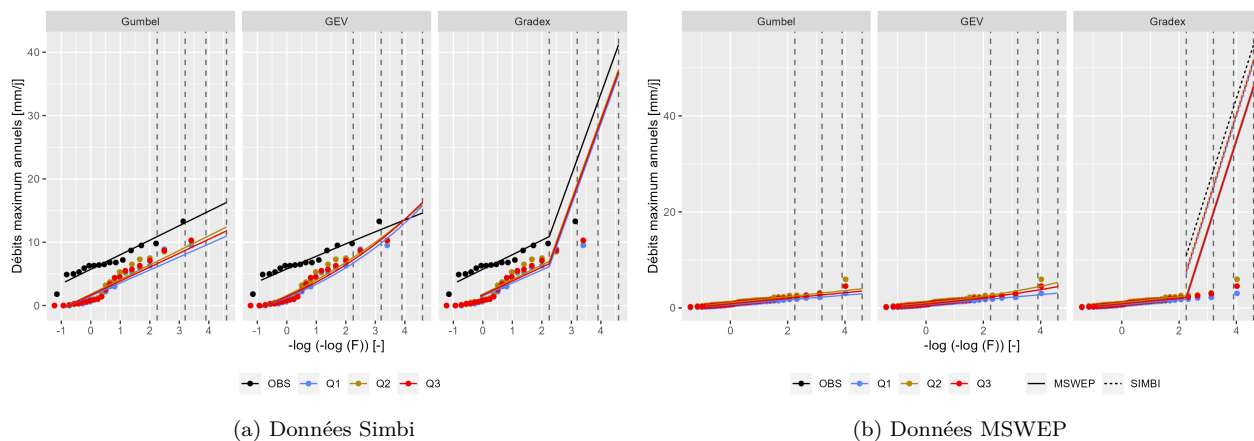


FIGURE A.29 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-037, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

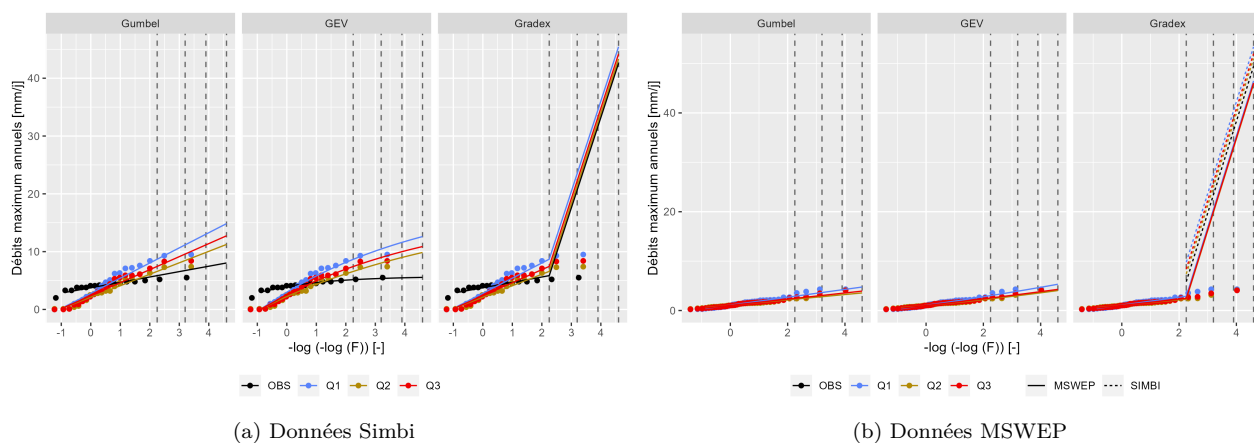


FIGURE A.30 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-041, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

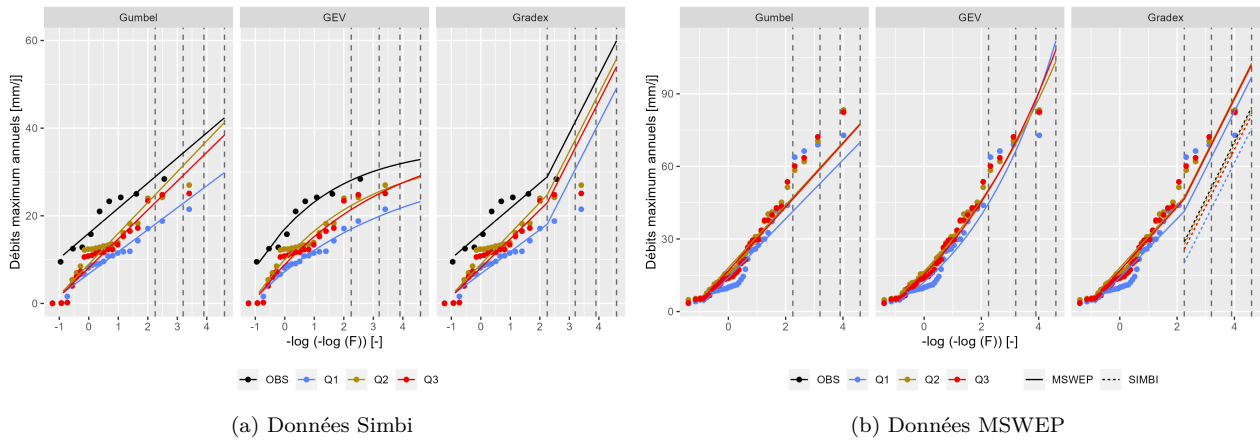


FIGURE A.31 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-044, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

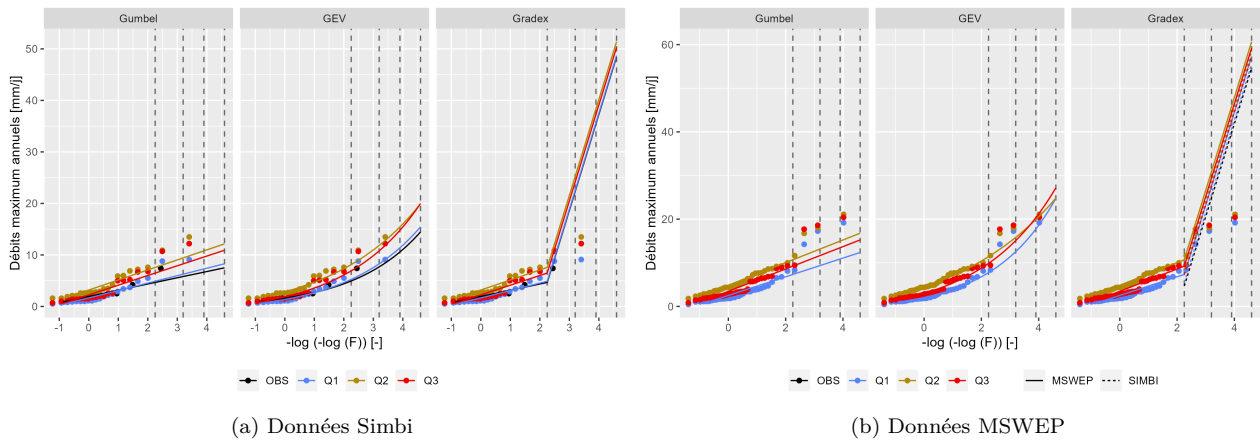


FIGURE A.32 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-045, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

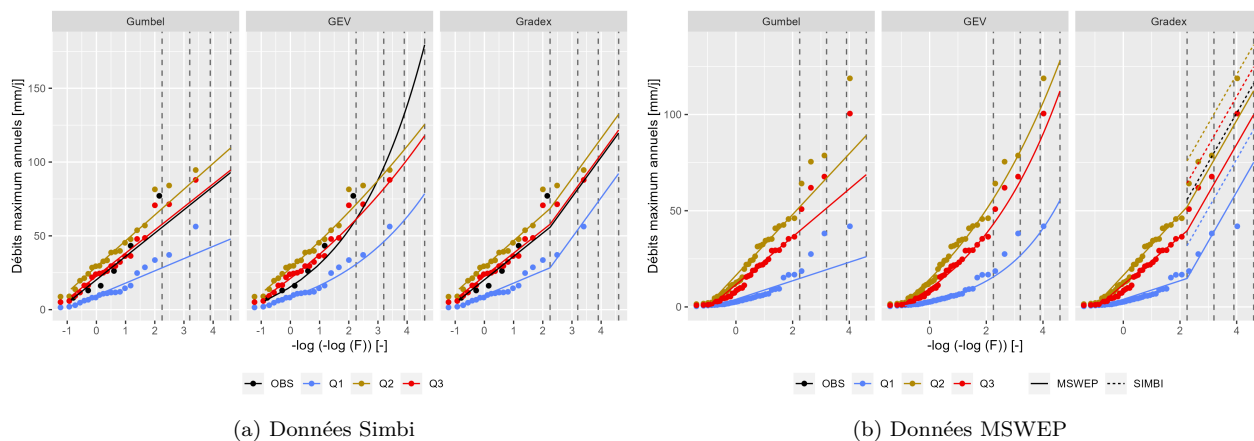


FIGURE A.33 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-051, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

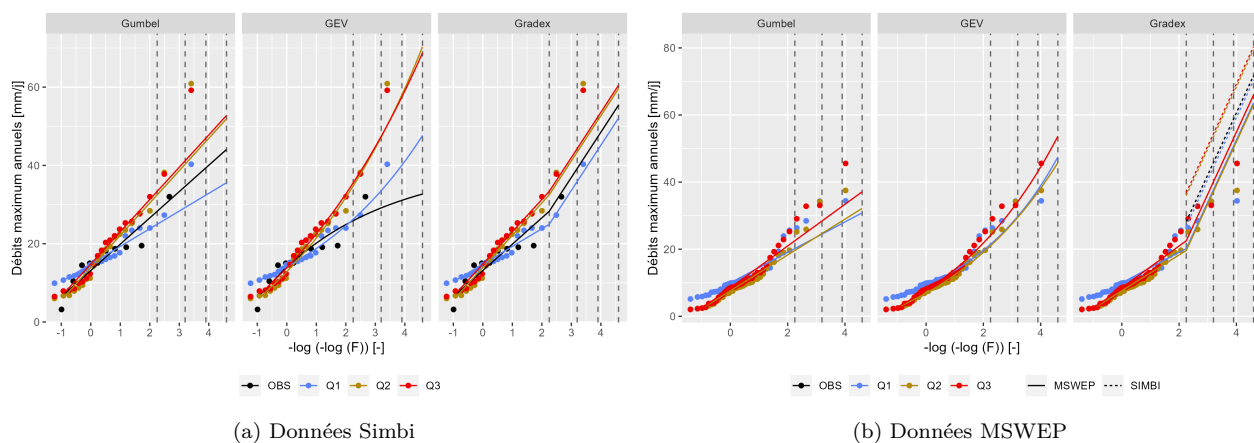


FIGURE A.34 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-052, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

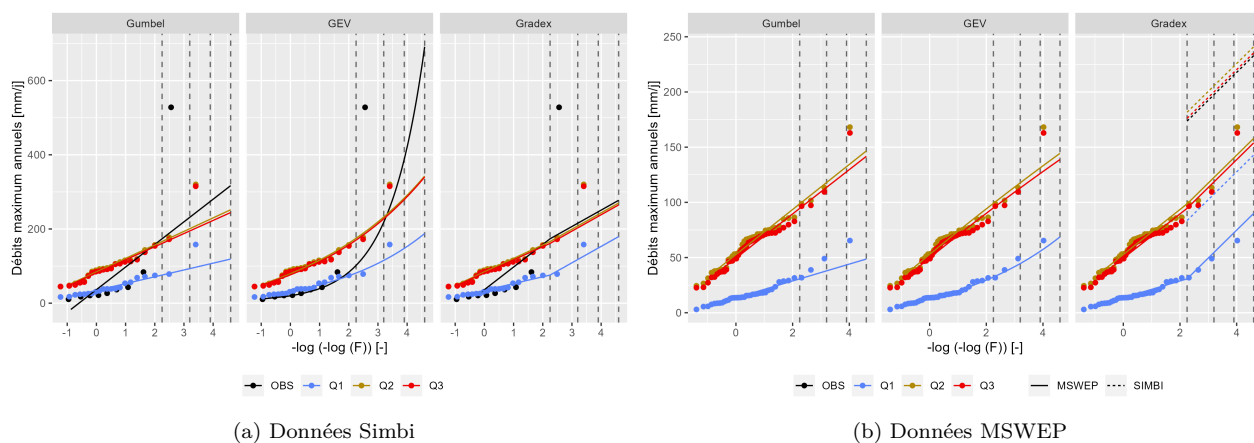


FIGURE A.35 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-053, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

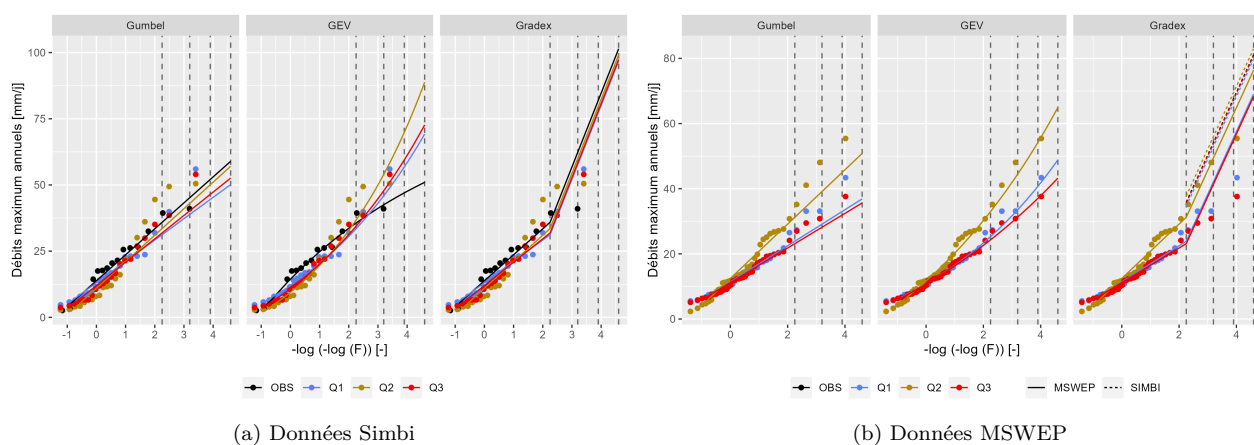


FIGURE A.36 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-056, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

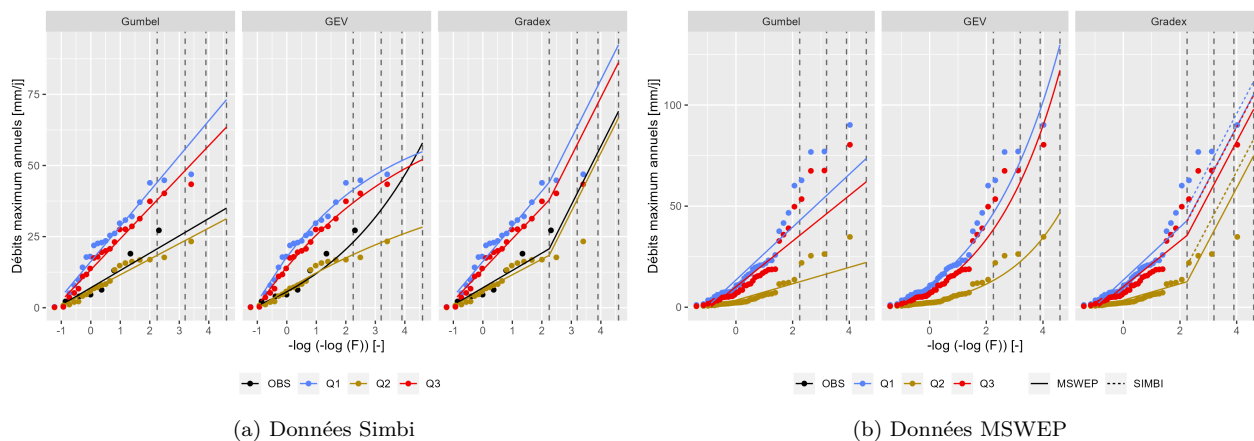


FIGURE A.37 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-058, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

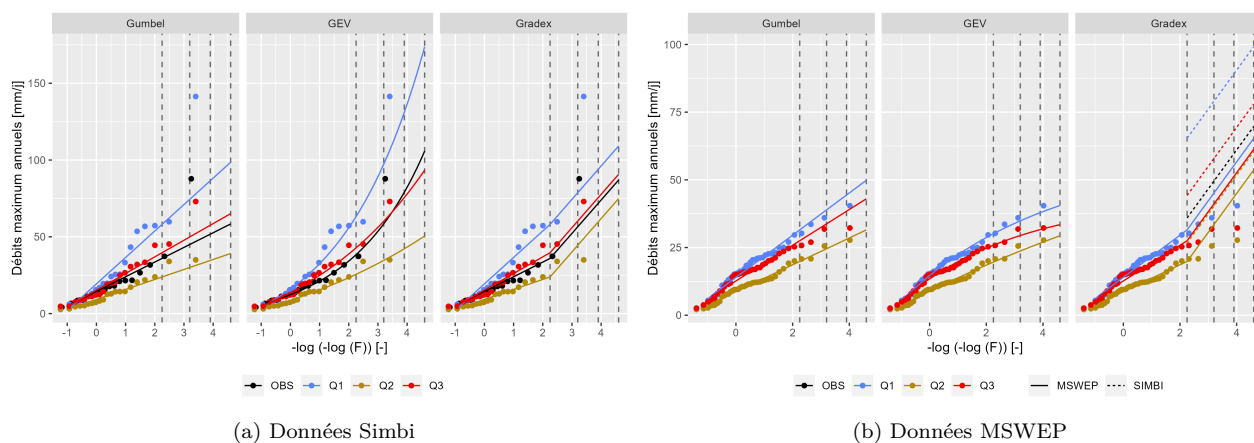


FIGURE A.38 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-060, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

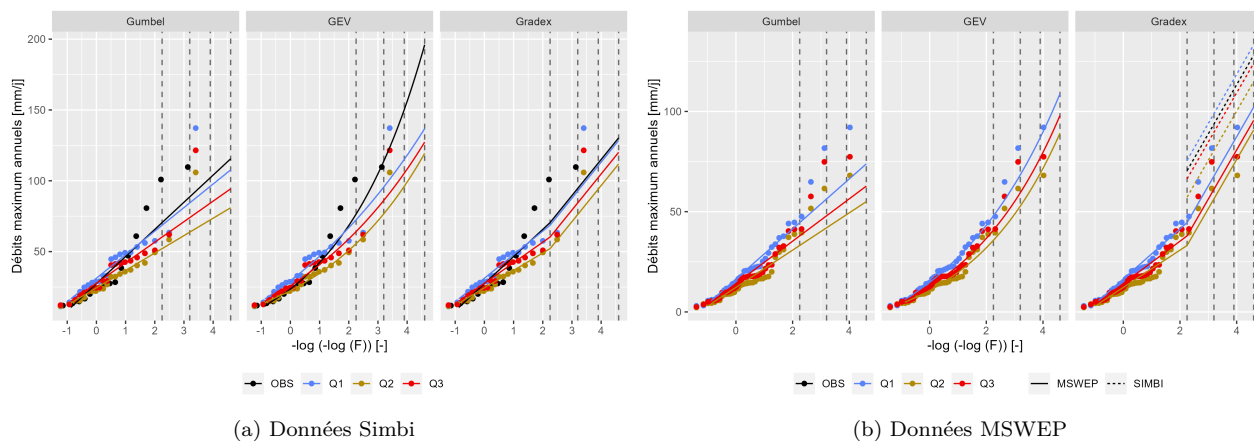


FIGURE A.39 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-061, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

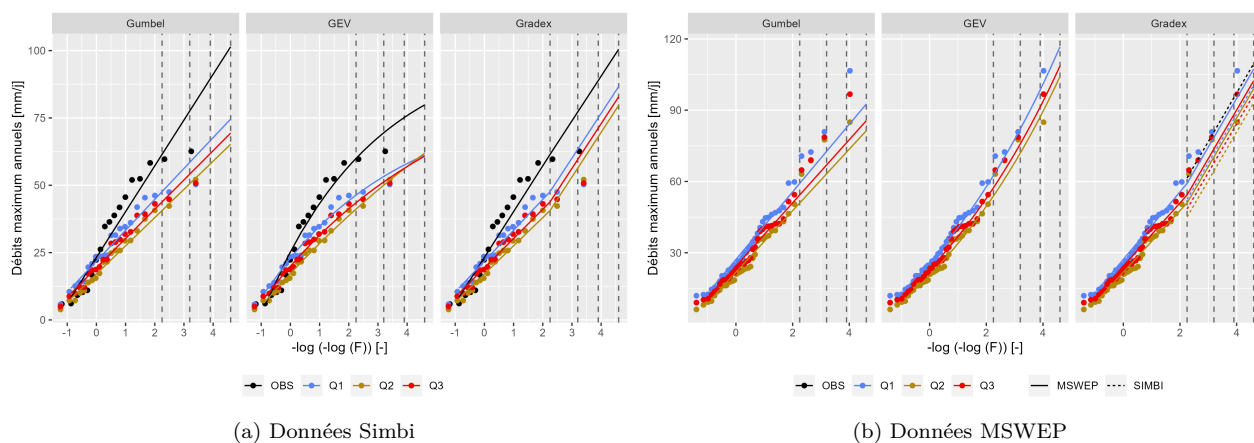


FIGURE A.40 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-065, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

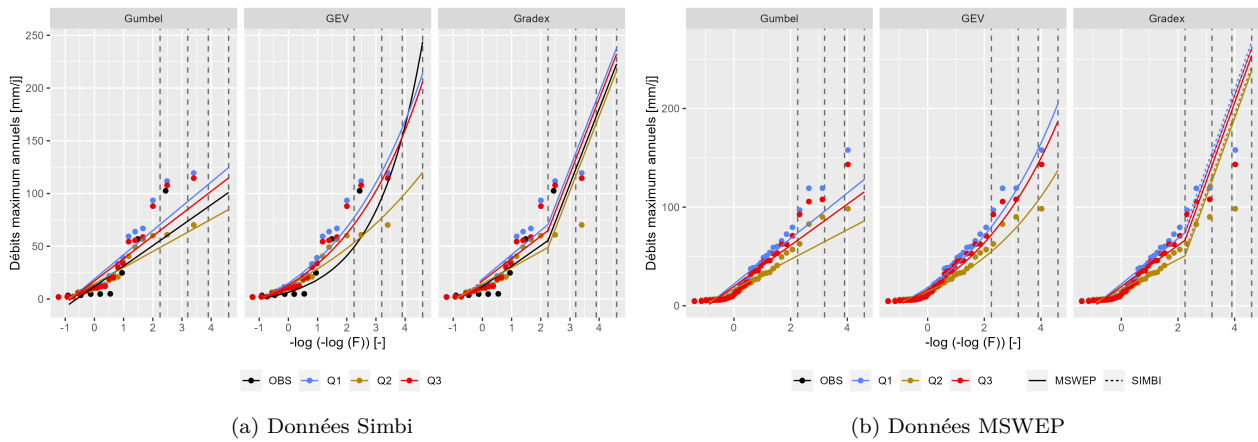


FIGURE A.41 – Prédétermination à partir des débits observés et simulés Q-068, et calculés avec les données Simbi à gauche (période historique) et MSWEP à droite (période récente). Les lignes verticales discontinues représentent les périodes de retour de 10, 25, 50, et 100 ans.

Références

- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., and Yang, H. : Assessing the impact of climate change on water resources in Iran, *Water Resources Research*, 45, <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>, 2009.
- Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., and Clark, M. P. : The CAMELS data set : Catchment attributes and meteorology for large-sample studies, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 5293–5313, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017>, 2017.
- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P., and Nelkin, E. : The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present), *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147–1167, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004%3C1147:TVGPCP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004%3C1147:TVGPCP%3E2.0.CO;2), 2003.
- Agudelo, P. A., Hoyos, C. D., Curry, J. A., and Webster, P. J. : Probabilistic discrimination between large-scale environments of intensifying and decaying African Easterly Waves, *Clim Dyn*, 36, 1379–1401, <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0851-x>, 2011.
- Albert, C. : Estimation des limites d’extrapolation par les lois de valeurs extrêmes. Application à des données environnementales, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2018.
- Alfieri, L., Lorini, V., Hirpa, F. A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C., and Salamon, P. : A global streamflow reanalysis for 1980–2018, *Journal of Hydrology X*, 6, 100049, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>, 2020.
- Alijanian, M., Rakhshandehroo, G. R., Mishra, A. K., and Dehghani, M. : Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran, *International Journal of Climatology*, 37, 4896–4914, <https://doi.org/10.1002/joc.5131>, 2017.
- Allaire, J., Xie, Y., Dervieux, C., McPherson, J., Luraschi, J., Ushey, K., Atkins, A., Wickham, H., Cheng, J., Chang, W., and Iannone, R. : Rmarkdown: Dynamic Documents for R, 2023.
- Alpert, L. : The areal distribution of mean annual rainfall over the island of Hispaniola, *Monthly Weather Review*, 69, 201–4, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1941\)069%3C0201:TADOMA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1941)069%3C0201:TADOMA%3E2.0.CO;2), 1941.
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A. : The CAMELS-CL dataset : Catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 5817–5846, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>, 2018.
- Andersson, L. : Improvements of runoff models what way to go ?, *Hydrology Research*, 23, 315–332, 1992.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., and Lavabre, J. : Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models, *Journal of Hydrology*, 250, 206–223, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00437-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00437-1), 2001.
- Andréassian, V., Perrin, C., and Michel, C. : Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models, *Journal of Hydrology*, 286, 19–35, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.030>, 2004.
- Angeles, M. E., González, J. E., Ramírez-Beltrán, N. D., Tepley, C. A., and Comarazamy, D. E. : Origins of the Caribbean Rainfall Bimodal Behavior, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 115, <https://doi.org/10.1029/2009JD012990>, 2010.
- Anthony Chen, A. and Taylor, M. A. : Investigating the link between early season Caribbean rainfall and the El Niño+ 1 year, *International Journal of Climatology : A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22, 87–106, <https://doi.org/10.1002/joc.711>, 2002.
- Arciniega-Esparza, S., Birkel, C., Chavarria-Palma, A., Arheimer, B., and Breña-Naranjo, J. A. : Remote sensing-aided rainfall–runoff modeling in the tropics of Costa Rica, *Hydrology and Earth System Sciences*,

- 26, 975–999, <https://doi.org/10.5194/hess-26-975-2022>, 2022.
- Arenas, A. D. : Hydrological Characteristics of the Caribbean’, Hydrology of the Humid Tropical Regions with Particular Reference to the Hydrological Effects of Agriculture and Forestry Practice, 1983a.
- Arenas, A. D. : Tropical storms in Central America and the Caribbean : Characteristic rainfall and forecasting of flash floods, Hydrology of humid tropical regions. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication, 39–51, 1983b.
- Arnaud, P. and Lavabre, J. : La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues, *rseau*, 13, 441–462, <https://doi.org/10.7202/705402ar>, 2000.
- Arnaud, P. and Lavabre, J. : Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation, *Water Resources Research*, 38, 11-1-11-11, <https://doi.org/10.1029/2001WR000474>, 2002.
- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., Nelson, B. R., and Prat, O. P. : PERSIANN-CDR : Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 69–83, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>, 2015.
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo-Osorio, J. D., and Think, N. X. : Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America, *Atmospheric Research*, 213, 34–50, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011>, 2018.
- Bakun, W. H., Flores, C. H., and ten Brink, U. S. : Significant Earthquakes on the Enriquillo Fault System, Hispaniola, 1500–2010 : Implications for Seismic Hazard, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 18–30, <https://doi.org/10.1785/0120110077>, 2012.
- Bathelemy, R. and Brigode, P. : Définition de seuils critiques de cumul de pluie pour l’anticipation des inondations en Haïti, Mémoire M2, Université d’Etat d’Haïti, 2019.
- Bathelemy, R., Brigode, P., Boisson, D., Emmanuel, T., Balieu, O., Duffar, L., Lecossois, G., and Randrianasolo, A. : Using satellite rainfall estimations for the definition of heavy rainfall statistics on two Caribbean watersheds, AGU, 2021.
- Bathelemy, R., Brigode, P., Boisson, D., and Tric, E. : Rainfall in the Greater and Lesser Antilles : Performance of five gridded datasets on a daily timescale, *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 43, 101203, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101203>, 2022.
- Bathelemy, R., Brigode, P., Andréassian, V., Perrin, C., Moron, V., Gaucherel, C., Tric, E., and Boisson, D. : Simbi database : Historical hydro-meteorological time series and catchment attributes in Haiti, 1905–2005, <https://doi.org/10.23708/02POK6>, 2023a.
- Bathelemy, R., Brigode, P., Andréassian, V., Perrin, C., Moron, V., Gaucherel, C., Tric, E., and Boisson, D. : Simbi : Historical hydro-meteorological time series and signatures for 24 catchments in Haiti, *Earth System Science Data Discussions*, 1–34, <https://doi.org/10.5194/essd-2023-259>, 2023b.
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Dijk, A. I. J. M. van, McVicar, T. R., and Adler, R. F. : MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation : Methodology and Quantitative Assessment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 473–500, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>, 2019.
- Beirlant, J., Goegebeur, Y., Segers, J., and Teugels, J. : Statistics of extremes: theory and applications, 2004.
- Benfield, A. : Hurricane Matthew event recap report, AON Benfield Thought Leadership, 2017.
- Bengtsson, H. : R.utils: Various Programming Utilities, 2023.
- Benoit, L., Sichoix, L., Nugent, A. D., Lucas, M. P., and Giambelluca, T. W. : Stochastic daily rainfall generation on tropical islands with complex topography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 2113–2129, <https://doi.org/10.5194/hess-26-2113-2022>, 2022.
- Bois, P. : Contrôle de séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation, ORSTOM, 1987.
- Boisson, D. and Pubellier, M. : Carte géologique à 1/250 000 de la République d’Haïti [Geologic map of the Republic of Haiti at 1/250,000] BME, IMAGEO, CNRS, Paris, 1987.
- Bonhomme, V., Frelat, R., and Gaucherel, C. : Application of elliptical Fourier analysis to watershed boundaries : A case study in Haiti, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 19, 17–26, <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10100>, 2013.
- Bozza, A., Durand, A., Confortola, G., Soncini, A., Allenbach, B., and Bocchiola, D. : Potential of remote sensing and open street data for flood mapping in poorly gauged areas : A case study in Gonaïves, Haiti, *Appl Geomat*, 8, 117–131, <https://doi.org/10.1007/s12518-016-0171-x>, 2016.

- Brandimarte, L., Brath, A., Castellarin, A., and Baldassarre, G. D. : Isla Hispaniola : A trans-boundary flood risk mitigation plan, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 209–218, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.03.002>, 2009.
- Brigode, P., Brissette, F., Nicault, A., Perreault, L., Kuentz, A., Mathevet, T., and Gailhard, J. : Streamflow variability over the 1881–2011 period in northern Québec : Comparison of hydrological reconstructions based on tree rings and geopotential height field reanalysis, *Climate of the Past*, 12, 1785–1804, <https://doi.org/10.5194/cp-12-1785-2016>, 2016.
- Brigode, P., Génot, B., Lobligeois, F., and Delaigue, O. : Summary sheets of watershed-scale hydroclimatic observed data for France, <https://doi.org/10.15454/UV01P1>, 2020.
- Brinkmann, W. A. R. : What is a foehn ?, *Weather*, 26, 230–240, <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1971.tb04200.x>, 1971.
- Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B., and Wagner, W. : SM2RAIN–ASCAT (2007–2018) : Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations, *Earth System Science Data*, 11, 1583–1601, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>, 2019.
- Brochart, D. and Andréassian, V. : Correction des estimations des pluies par satellite pour les bassins versants de Guyane française, *Bulletin des Séances de l’Académie Royale des Sciences d’Outre-Mer*, 60, 361–370, 2014.
- Bruijnzeel, L. A. : Hydrological functions of tropical forests : Not seeing the soil for the trees ?, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 185–228, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>, 2004.
- Burgess, C. P., Taylor, M. A., Spencer, N., Jones, J., and Stephenson, T. S. : Estimating damages from climate-related natural disasters for the Caribbean at 1.5 °C and 2 °C global warming above preindustrial levels, *Reg Environ Change*, 18, 2297–2312, <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1423-6>, 2018.
- Burnash, R. J. C. : The NWS River Forecast System-catchment modeling., *Computer models of watershed hydrology.*, 311–366, 1995.
- Butterlin, J. : *Geologie generale et regionale de la Republique d’Haiti*, Éditions de l’IHEAL, Paris, 1960.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Devers, A., and Graff, B. : Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2923–2951, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2923-2017>, 2017.
- Calais, E., Boisson, D., Symithe, S., Prépetit, C., Pierre, B., Ulyse, S., Hurbon, L., Gilles, A., Théodat, J.-M., Monfret, T., Deschamps, A., Courboux, F., Chèze, J., Peix, F., Bertrand, E., Ampuero, J.-P., Mercier de Lépinay, B., Balestra, J., Berenguer, J.-L., Bossu, R., Fallou, L., and Clouard, V. : A Socio-Seismology Experiment in Haiti, *Frontiers in Earth Science*, 8, 2020.
- Calais, E., Symithe, S., Monfret, T., Delouis, B., Lomax, A., Courboux, F., Ampuero, J. P., Lara, P. E., Bletery, Q., Chèze, J., Peix, F., Deschamps, A., de Lépinay, B., Raimbault, B., Jolivet, R., Paul, S., St Fleur, S., Boisson, D., Fukushima, Y., Duputel, Z., Xu, L., and Meng, L. : Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake, *Science*, 376, 283–287, <https://doi.org/10.1126/science.abn1045>, 2022a.
- Calais, E., Symithe, S. J., and de Lépinay, B. M. : Strain Partitioning within the Caribbean–North America Transform Plate Boundary in Southern Haiti, Tectonic and Hazard Implications, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113, 131–142, <https://doi.org/10.1785/0120220121>, 2022b.
- Cantet, P. : Mapping the mean monthly precipitation of a small island using kriging with external drifts, *Theor Appl Climatol*, 127, 31–44, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1610-z>, 2017.
- Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A., Taylor, M. A., Herrera, D. A., Martinez-Castro, D., Gouirand, I., Sierra-Lorenzo, M., Vichot-Llano, A., Stephenson, T., Fonseca, C., Campbell, J., and Alpizar, M. : Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations, *Atmosphere*, 11, 1334, <https://doi.org/10.3390/atmos11121334>, 2020.
- Cernesson, F., Lavabre, J., and Masson, J.-M. : Stochastic model for generating hourly hyetographs, *Atmospheric Research*, 42, 149–161, [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00060-7), 1996.
- Chadee, X. T. and Clarke, R. M. : Daily near-surface large-scale atmospheric circulation patterns over the wider Caribbean, *Clim Dyn*, 44, 2927–2946, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2621-2>, 2015.
- Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., and Siqueira, V. A. : CAMELS-BR : Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil, *Earth System Science Data*, 12, 2075–2096, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020>, 2020.
- Change, I. C. : Impacts, adaptation, and vulnerability, Part A : global and sectoral aspects. Contribution of

- working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change, 1132, 2014.
- Chery, R. : Évolution des régimes de pluie et des précipitations extrêmes en contexte de changement climatique : Le cas d'Haïti, These en préparation, Antilles, 2023.
- Chokkavarapu, N. and Mandla, V. R. : Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models : A review toward future climate change impact estimation, *SN Appl. Sci.*, 1, 1698, <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1764-x>, 2019.
- Churches, C. E., Wampler, P. J., Sun, W., and Smith, A. J. : Evaluation of forest cover estimates for Haiti using supervised classification of Landsat data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 203–216, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.020>, 2014.
- Coles, S. : An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer London, London, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>, 2001.
- Cook, K. H. and Vizy, E. K. : Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation, *J. Climate*, 23, 1477–1494, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3210.1>, 2010.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., and Le Moine, N. : Graphical tools based on Turc-Budyko plots to detect changes in catchment behaviour, *Hydrological Sciences Journal*, 60, 1394–1407, <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.964245>, 2015.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., and Andréassian, V. : The suite of lumped GR hydrological models in an R package, *Environmental Modelling & Software*, 94, 166–171, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>, 2017.
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., Bourgin, F., Brigode, P., Moine, N. L., Mathevet, T., Mouelhi, S., Oudin, L., Pushpalatha, R., and Valéry, A. : airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling, 2023.
- Courboux, F., Monfret, T., Paul, S., Calais, E., Symithe, S., Chèze, J., Fleur, S. S., Deschamps, A., Delouis, B., Ampuero, J. P., Peix, F., Balestra, J., Lépinay, B. M. de, Fallou, L., Bossu, R., Corbet, A., Boisson, D., Hurbon, L., Calixte, N., and Lomax, A. : Le réseau de sismologie citoyenne en Haïti face au séisme de Nippes (Mw 7.2) du 14 Aout 2021, 5èmes Rencontres Scientifiques et Techniques Résif, 2021.
- Coxon, G., Addor, N., Bloomfield, J. P., Freer, J., Fry, M., Hannaford, J., Howden, N. J. K., Lane, R., Lewis, M., Robinson, E. L., Wagener, T., and Woods, R. : CAMELS-GB : Hydrometeorological time series and landscape attributes for 671 catchments in Great Britain, *Earth System Science Data*, 12, 2459–2483, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2459-2020>, 2020.
- Cressie, N. : The origins of kriging, *Math Geol*, 22, 239–252, <https://doi.org/10.1007/BF00889887>, 1990.
- Croley, T. E. and Hartmann, H. C. : Resolving Thiessen polygons, *Journal of Hydrology*, 76, 363–379, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90143-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90143-X), 1985.
- Crooks, S. M. and Kay, A. L. : Simulation of river flow in the Thames over 120 years : Evidence of change in rainfall-runoff response ?, *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 4, 172–195, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.014>, 2015.
- Curtis, S. : Daily precipitation distributions over the intra-Americas sea and their interannual variability, *Atmósfera*, 26, 243–259, 2013.
- Daly, C., Helmer, E. H., and Quiñones, M. : Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra, *International Journal of Climatology*, 23, 1359–1381, <https://doi.org/10.1002/joc.937>, 2003.
- Davis, R. E., Hayden, B. P., Gay, D. A., Phillips, W. L., and Jones, G. V. : The North Atlantic Subtropical Anticyclone, *J. Climate*, 10, 728–744, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010%3C0728:TNASA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010%3C0728:TNASA%3E2.0.CO;2), 1997.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., Berg, L. van de, Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., Rosnay, P. de, Tavolato, C., Thépaut, J.-N., and Vitart, F. : The ERA-Interim reanalysis : Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597, <https://doi.org/10.1002/qj.828>, 2011.
- Defays, D. : An efficient algorithm for a complete link method, *The computer journal*, 20, 364–366, 1977.
- Delus, C., Grelier, B., François, D., Drogue, G., Vidal, J.-P., Caillouet, L., Devers, A., Sauquet, E., and Lauermet, C. : Évaluation et comparaison de séries de précipitations historiques dans des sous-bassins versants de

- la Meuse et de la Moselle, 1871-2004, *Climatologie*, 16, 52–71, <https://doi.org/10.4267/climatologie.1378>, 2019.
- Delus, C., Bonnot, É., François, D., Lejeune, T., Rochel, X., Mathis, D., and Abèle, J. : Historique des crues et risque d'inondation dans la vallée de la Meurthe depuis le XVIIIe siècle, *vertigo*, 21, 1–30, <https://doi.org/10.4000/vertigo.34420>, 2021.
- DesRoches, R., Comerio, M., Eberhard, M., Mooney, W., and Rix, G. J. : Overview of the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra*, 27, 1–21, <https://doi.org/10.1193/1.3630129>, 2011.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Bakalowicz, M., Weng, P., and Al-Malki, A. : Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer, *Journal of Hydrology*, 274, 248–269, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00418-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00418-3), 2003.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., and Qatan, A. : Spatial measurements of stream baseflow, a relevant method for aquifer characterization and permeability evaluation. Application to a hard-rock aquifer, the Oman ophiolite, *Hydrological Processes*, 18, 3391–3400, <https://doi.org/10.1002/hyp.1502>, 2004.
- Di Piazza, A., Conti, F. L., Noto, L. V., Viola, F., and La Loggia, G. : Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 396–408, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.01.005>, 2011.
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S. J., and Ropelewski, C. F. : Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography, *International Journal of Remote Sensing*, 28, 1503–1526, <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>, 2007.
- Douilly, R., Paul, S., Monfret, T., Deschamps, A., Ambrois, D., Smithe, S. J., St Fleur, S., Courboux, F., Calais, E., Boisson, D., de Lépinay, B. M., Font, Y., and Chèze, J. : Rupture Segmentation of the 14 August 2021 Mw 7.2 Nippes, Haiti, Earthquake Using Aftershock Relocation from a Local Seismic Deployment, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113, 58–72, <https://doi.org/10.1785/0120220128>, 2022.
- Duboe, A. : Monographie hydrologique du bassin supérieur du Salât, *La Houille Blanche*, 862–869, 1963.
- Dunnington, D., Thorne, B., and Hernangómez, D. : Ggsatial: Spatial Data Framework for Ggplot2, 2023.
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., Amador, J. A., and Nieto, R. : Correction to "Moisture sources for Central America : Identification of moisture sources using a Lagrangian analysis technique", *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 115, 2010.
- Edijatno : Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier, Université Louis Pasteur (Strasbourg), 1991.
- Edijatno and Michel, C. : Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, *La Houille Blanche*, 75, 113–122, 1989.
- Edijatno, Nascimento, N. O., Yang, X., Makhlof, Z., and Michel, C. : GR3J : A daily watershed model with three free parameters, *Hydrological sciences journal*, 44, 263–277, 1999.
- Elusma, M., Tung, C., and Lee, C.-C. : Agricultural drought risk assessment in the Caribbean region : The case of Haiti, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 83, 103414, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103414>, 2022.
- Emmanuel, E. and Lindskog, P. : Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti, in : *Actes du Colloque International : Gestion Intégrée de l'eau en Haïti*. Port-au-Prince, 2002.
- Emmanuel, E. and Vermande, P. : Gestion Intégrée de l'Eau en Haïti Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince, les 26,27,28 juin 2002, 2002.
- Enfield, D. B. : Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability, *Geophysical research letters*, 23, 3305–3308, 1996.
- Evans, J. P. : Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models, *Journal of Hydrology*, 284, 211–227, 2003.
- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A., and Zhao, L. : Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China, *Atmospheric Research*, 223, 24–38, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>, 2019.
- Fassig, O. L. : A tentative chart of annual rainfall over the island of haiti-santo domingo, *Mon. Wea. Rev.*, 57, 296–296, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1929\)57%3C296a:ATCOAR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1929)57%3C296a:ATCOAR%3E2.0.CO;2), 1929.
- Fick, S. E. and Hijmans, R. J. : WorldClim 2 : New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315, <https://doi.org/10.1002/joc.5086>, 2017.
- Fisher, R. A. and Tippett, L. H. C. : Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest

- member of a sample, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24, 180–190, <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>, 1928.
- Fowler, K. J. A., Acharya, S. C., Addor, N., Chou, C., and Peel, M. C. : CAMELS-AUS : Hydrometeorological time series and landscape attributes for 222 catchments in Australia, *Earth System Science Data*, 13, 3847–3867, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3847-2021>, 2021.
- Fulton, R. A., Breidenbach, J. P., Seo, D.-J., Miller, D. A., and O’Bannon, T. : The WSR-88D Rainfall Algorithm, *Weather and Forecasting*, 13, 377–395, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%3C0377:TWRA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%3C0377:TWRA%3E2.0.CO;2), 1998.
- Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D., and Husak, G. : A global satellite-assisted precipitation climatology, *Earth System Science Data*, 7, 275–287, <https://doi.org/10.5194/essd-7-275-2015>, 2015a.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., and Michaelsen, J. : The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes, *Scientific Data*, 2, 150066, <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>, 2015b.
- Gamble, D. W. and Curtis, S. : Caribbean precipitation : Review, model and prospect, *Progress in Physical Geography : Earth and Environment*, 32, 265–276, <https://doi.org/10.1177/0309133308096027>, 2008.
- Gampe, D. and Ludwig, R. : Evaluation of Gridded Precipitation Data Products for Hydrological Applications in Complex Topography, *Hydrology*, 4, 53, <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053>, 2017.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça, S., Montanarella, L., and Muniz, U. O. : Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comision Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995, Luxembourg, 2014.
- Gaucherel, C., Frelat, R., Lustig, A., Rouy, B., Chéry, Y., and Hubert, P. : Time–frequency analysis to profile hydrological regimes : Application to Haiti, *Hydrological Sciences Journal*, 61, 274–288, <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1006231>, 2016.
- Gaucherel, C., Frelat, R., Salomon, L., Rouy, B., Pandey, N., and Cudennec, C. : Regional watershed characterization and classification with river network analyses, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 2068–2081, <https://doi.org/10.1002/esp.4172>, 2017.
- Gaucherel, C., Frelat, R., Polidori, L., El Hage, M., Cudennec, C., Mondesir, P., and Moron, V. : Weak relationships between landforms and hydro-climatologic processes : A case study in Haiti, *Hydrology Research*, 50, 744–760, <https://doi.org/10.2166/nh.2018.041>, 2018.
- George, S. E. and Saunders, M. A. : North Atlantic Oscillation impact on tropical North Atlantic winter atmospheric variability, *Geophysical Research Letters*, 28, 1015–1018, <https://doi.org/10.1029/2000GL012449>, 2001.
- Giannini, A., Kushnir, Y., and Cane, M. A. : Interannual Variability of Caribbean Rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean, *Journal of Climate*, 13, 297–311, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C0297:IVOCRE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C0297:IVOCRE%3E2.0.CO;2), 2000.
- Gilleland, E. : Bootstrap Methods for Statistical Inference. Part I : Comparative Forecast Verification for Continuous Variables, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37, 2117–2134, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0069.1>, 2020a.
- Gilleland, E. : Bootstrap Methods for Statistical Inference. Part II : Extreme-Value Analysis, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37, 2135–2144, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0070.1>, 2020b.
- Gilleland, E. and Katz, R. W. : extRemes 2.0 : An Extreme Value Analysis Package in R, *Journal of Statistical Software*, 72, 1–39, <https://doi.org/10.18637/jss.v072.i08>, 2016.
- Gnedenko, B. : Sur La Distribution Limite Du Terme Maximum D’Une Serie Aleatoire, *Annals of Mathematics*, 44, 423–453, <https://doi.org/10.2307/1968974>, 1943.
- Gosset, M., Viarre, J., Quantin, G., and Alcoba, M. : Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139, 923–940, <https://doi.org/10.1002/qj.2130>, 2013.
- Gosset, M., Dibi-Anoh, P. A., Schumann, G., Hostache, R., Paris, A., Zahiri, E.-P., Kacou, M., and Gal, L. : Hydrometeorological Extreme Events in Africa : The Role of Satellite Observations for Monitoring Pluvial and Fluvial Flood Risk, *Surv Geophys*, 44, 197–223, <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09749-6>, 2023.
- Gouirand, I., Moron, V., and Sing, B. : Seasonal atmospheric transitions in the Caribbean basin and Central America, *Clim Dyn*, 55, 1809–1828, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05356-6>, 2020.

- Griffith, C. G., Woodley, W. L., Grube, P. G., Martin, D. W., Stout, J., and Sikdar, D. N. : Rain Estimation from Geosynchronous Satellite Imagery—Visible and Infrared Studies, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1153–1171, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106%3C1153:REFGSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106%3C1153:REFGSI%3E2.0.CO;2), 1978.
- Grolemund, G. and Wickham, H. : Dates and Times Made Easy with lubridate, *Journal of Statistical Software*, 40, 1–25, <https://doi.org/10.18637/jss.v040.i03>, 2011.
- Guillot, P. and Duband, D. : La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies., 1967.
- Gumbel, E. J. : *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, 1958.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. : Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>, 2009.
- Habib, E., Larson, B. F., and Grasel, J. : Validation of NEXRAD multisensor precipitation estimates using an experimental dense rain gauge network in south Louisiana, *Journal of Hydrology*, 373, 463–478, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.010>, 2009.
- Hurricanes Fay, Gustav, Hanna, and Ike 2008 Haiti Post Disaster Needs Assessment : <https://www.preventionweb.net/publication/hurricanes-fay-gustav-hanna-and-ike-2008-haiti-post-disaster-needs-assessment>, last access : 20 May 2023.
- Han, D. and Bray, M. : Automated Thiessen polygon generation, *Water Resources Research*, 42, <https://doi.org/10.1029/2005WR004365>, 2006.
- Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Barnard, C., Cloke, H., and Pappenberger, F. : GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present, *Earth System Science Data*, 12, 2043–2060, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>, 2020.
- Harris, I., Jones, P. d., Osborn, T. j., and Lister, D. h. : Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *International Journal of Climatology*, 34, 623–642, <https://doi.org/10.1002/joc.3711>, 2014.
- Hastenrath, S. : The intertropical convergence zone of the eastern Pacific revisited, *International Journal of Climatology*, 22, 347–356, <https://doi.org/10.1002/joc.739>, 2002.
- Hastenrath, S. and Polzin, D. : Climatic variations in Central America and the Caribbean, *International Journal of Climatology*, 33, 1348–1356, <https://doi.org/10.1002/joc.3515>, 2013.
- Hedges, S. B., Cohen, W. B., Timyan, J., and Yang, Z. : Haiti’s biodiversity threatened by nearly complete loss of primary forest, *PNAS*, 115, 11850–11855, <https://doi.org/10.1073/pnas.1809753115>, 2018.
- Henderson-Sellers, A. and Robinson, P. J. : *Contemporary climatology*, Prentice Hall, 1986.
- Hernández Ayala, J. J. and Matyas, C. J. : Tropical cyclone rainfall over Puerto Rico and its relations to environmental and storm-specific factors, *International Journal of Climatology*, 36, 2223–2237, <https://doi.org/10.1002/joc.4490>, 2016.
- Hersbach, H. and De Rosnay, B. B. S. : Operational global reanalysis: Progress, future directions and synergies with NWP, ECMWF, 2018.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G. D., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P. de, Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. : The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.
- Hibbs, B. J. and Sharp, J. M., Jr : Hydrogeological Impacts of Urbanization, *Environmental & Engineering Geoscience*, 18, 3–24, <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.18.1.3>, 2012.
- Hijmans, R. J., Eten, J. van, Sumner, M., Cheng, J., Baston, D., Bevan, A., Bivand, R., Busetto, L., Canty, M., Fasoli, B., Forrest, D., Ghosh, A., Golicer, D., Gray, J., Greenberg, J. A., Hiemstra, P., Hingee, K., Ilich, A., Geosciences, I. for M. A., Karney, C., Mattiuzzi, M., Mosher, S., Naimi, B., Nowosad, J., Pebesma, E., Lamigueiro, O. P., Racine, E. B., Rowlingson, B., Shortridge, A., Venables, B., and Wueest, R. : *Raster: Geographic Data Analysis and Modeling*, 2023a.
- Hijmans, R. J., Bivand, R., Pebesma, E., and Sumner, M. D. : *Terra: Spatial Data Analysis*, 2023b.
- Hofert, M., Hornik, K., and McNeil, A. J. : *Qrmtools: Tools for Quantitative Risk Management*, 2022.
- Höge, M., Kauzlaric, M., Siber, R., Schönenberger, U., Horton, P., Schwanbeck, J., Floriancic, M. G., Viviroli,

- D., Wilhelm, S., Sikorska-Senoner, A. E., Addor, N., Brunner, M., Pool, S., Zappa, M., and Fenicia, F. : CAMELS-CH : Hydro-meteorological time series and landscape attributes for 331 catchments in hydrologic Switzerland, *Earth System Science Data Discussions*, 1–46, <https://doi.org/10.5194/essd-2023-127>, 2023.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., and Wood, E. F. : Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments, *Technometrics*, 27, 251–261, 1985.
- Hotelling, H. : Relations between two sets of variates, in : *Breakthroughs in statistics : Methodology and distribution*, Springer, 162–190, 1992.
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., and Iguchi, T. : The Global Precipitation Measurement Mission, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 701–722, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>, 2014.
- Hu, Z.-Z., Kumar, A., Huang, B., Xue, Y., Wang, W., and Jha, B. : Persistent atmospheric and oceanic anomalies in the North Atlantic from summer 2009 to summer 2010, *Journal of Climate*, 24, 5812–5830, 2011.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., and Stocker, E. F. : The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) : Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales, *J. Hydrometeor.*, 8, 38–55, <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>, 2007.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., and Nelkin, E. J. : The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA), in : *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, edited by : Gebremichael, M. and Hossain, F., Springer Netherlands, Dordrecht, 3–22, https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1, 2010.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., and Yoo, S.-H. : NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG), *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version*, 4, 26, 2015.
- Inoue, M., Handoh, I. C., and Bigg, G. R. : Bimodal Distribution of Tropical Cyclogenesis in the Caribbean : Characteristics and Environmental Factors, *Journal of Climate*, 15, 2897–2905, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C2897:BDOTCI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C2897:BDOTCI%3E2.0.CO;2), 2002.
- Jean-Louis, N. : *History and Culture of Haiti: Journey Through Visual Art*, Xlibris Corporation, 332 pp., 2012.
- Jenkinson, A. F. : The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 158–171, <https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>, 1955.
- Jones, P. D. and Lister, D. H. : Riverflow reconstructions for 15 catchments over England and Wales and an assessment of hydrologic drought since 1865, *International Journal of Climatology*, 18, 999–1013, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199807\)18:9%3C999::AID-JOC300%3E3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199807)18:9%3C999::AID-JOC300%3E3.0.CO;2-8), 1998.
- Jones, P. D., Harpham, C., Harris, I., Goodess, C. M., Burton, A., Centella-Artola, A., Taylor, M. A., Bezanilla-Morlot, A., Campbell, J. D., Stephenson, T. S., Joslyn, O., Nicholls, K., and Baur, T. : Long-term trends in precipitation and temperature across the Caribbean, *International Journal of Climatology*, 36, 3314–3333, <https://doi.org/10.1002/joc.4557>, 2016.
- Joseph, A. : *Caractérisation et modélisation des écoulements de crue : application aux inondations de la ville de Cavaillon en Haiti*, Thèse de doctorat, UCL - Université Catholique de Louvain, 2019.
- Joseph, A., Gonomy, N., Zech, Y., and Soares-Frazão, S. : Modelling and analysis of the flood risk at Cavaillon City, Haiti, *La Houille Blanche*, 68–75, <https://doi.org/10.1051/lhb/2018020>, 2018.
- Joukainen, S. : Improving the calculation of potential evapotranspiration of the HBV model : Application to the Ounasjoki watershed, in : *Nordic hydrological conference*, 347–354, 2000.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., and Xie, P. : CMORPH : A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution, *J. Hydrometeor.*, 5, 487–503, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005%3C0487:CAMTPG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005%3C0487:CAMTPG%3E2.0.CO;2), 2004.
- Jury, M. R. : A quasi-decadal cycle in Caribbean climate, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114, <https://doi.org/10.1029/2009JD011741>, 2009a.
- Jury, M. R. : An Intercomparison of Observational, Reanalysis, Satellite, and Coupled Model Data on Mean Rainfall in the Caribbean, *J. Hydrometeor.*, 10, 413–430, <https://doi.org/10.1175/2008JHM1054.1>, 2009b.

- Jury, M. R. : Inter-annual rainfall variability in the eastern Antilles and coupling with the regional and intra-seasonal circulation, *Theor Appl Climatol*, 126, 727–737, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1612-x>, 2016.
- Kabouya, M. : Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale, Paris 11, 1990.
- Kabouya, M. and Michel, C. : Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride, *Revue des Sciences de l'Eau*, 4, 569–587, 1991.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., and Potter, G. L. : NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631–1644, <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>, 2002.
- Kassambara, A. : Ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots, 2023.
- Khouakhi, A., Villarini, G., and Vecchi, G. A. : Contribution of Tropical Cyclones to Rainfall at the Global Scale, *Journal of Climate*, 30, 359–372, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0298.1>, 2017.
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., and Kirschbaum, D. B. : So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 69–78, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>, 2017.
- Kishore, N., Marqués, D., Mahmud, A., Kiang, M. V., Rodriguez, I., Fuller, A., Ebner, P., Sorensen, C., Racy, F., Lemery, J., Maas, L., Leaning, J., Irizarry, R. A., Balsari, S., and Buckee, C. O. : Mortality in Puerto Rico after Hurricane Maria, *New England Journal of Medicine*, 379, 162–170, <https://doi.org/10.1056/NEJMsa1803972>, 2018.
- Klemeš, V. : Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13–24, <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>, 1986.
- Klingler, C., Schulz, K., and Herrnegger, M. : LamaH-CE : LArge-SaMple DAta for Hydrology and Environmental Sciences for Central Europe, *Earth System Science Data*, 13, 4529–4565, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4529-2021>, 2021.
- Knapp, K. R. : Scientific data stewardship of international satellite cloud climatology project B1 global geostationary observations, *JARS*, 2, 023548, <https://doi.org/10.1117/1.3043461>, 2008.
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., and Neumann, C. J. : The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) : Unifying Tropical Cyclone Data, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363–376, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>, 2010.
- Knapp, K. R., Ansari, S., Bain, C. L., Bourassa, M. A., Dickinson, M. J., Funk, C., Helms, C. N., Hennon, C. C., Holmes, C. D., Huffman, G. J., Kossin, J. P., Lee, H.-T., Loew, A., and Magnusdottir, G. : Globally Gridded Satellite Observations for Climate Studies, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 893–907, <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3039.1>, 2011.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., and Takahashi, K. : The JRA-55 Reanalysis : General Specifications and Basic Characteristics, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 93, 5–48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>, 2015.
- Kribèche, R. : Etude de la sensibilité d'un modèle pluie-débit à l'exactitude de l'évaporation (modèle GR4J), Mémoire DEA, Université Paris XII, Créteil, 1994.
- Krige, D. G. : A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand. M. Sc, Engineering, University of the Witwatersrand, 1951.
- Kucera, P. A., Ebert, E. E., Turk, F. J., Levizzani, V., Kirschbaum, D., Tapiador, F. J., Loew, A., and Borsche, M. : Precipitation from Space : Advancing Earth System Science, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 365–375, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00171.1>, 2013.
- Kuentz, A., Mathevet, T., Gailhard, J., and Hingray, B. : Building long-term and high spatio-temporal resolution precipitation and air temperature reanalyses by mixing local observations and global atmospheric reanalyses : The ANATEM model, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2717–2736, <https://doi.org/10.5194/hess-19-2717-2015>, 2015.
- Laing, A. G. : Cases of Heavy Precipitation and Flash Floods in the Caribbean during El Niño Winters, *Journal of Hydrometeorology*, 5, 577–594, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005%3C0577:COHPAF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005%3C0577:COHPAF%3E2.0.CO;2), 2004.
- Lang, M. and Lavabre, J. : Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations, Editions Quae, 2007.

- Lang, M., Arnaud, P., Carreau, J., Deaux, N., Dezileau, L., Garavaglia, F., Latapie, A., Neppel, L., Paquet, E., Renard, B., Soubeyroux, J.-M., Terrier, B., Veysseire, J.-M., Aubert, Y., Auffray, A., Borchhi, F., Bernardara, P., Carre, J.-C., Chambon, D., Cipriani, T., Delgado, J.-L., Doumenc, H., Fantin, R., Jourdain, S., Kochanek, K., Paquier, A., Sauquet, E., and Trambly, Y. : Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes, La Houille Blanche, 5–13, <https://doi.org/10.1051/lhb/2014010>, 2014.
- Lavabre, J., Arnaud, P., Masson, J. M., and Folton, N. : Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues, La Houille Blanche, 67–72, <https://doi.org/10.1051/lhb/1999037>, 1999.
- LGL : Projet d'inventaire des ressources hydrauliques, Agence Canadienne de Développement international (ACDI), Haïti, 1977.
- Li, X., Chen, Y., Deng, X., Zhang, Y., and Chen, L. : Evaluation and Hydrological Utility of the GPM IMERG Precipitation Products over the Xinfengjiang River Reservoir Basin, China, *Remote Sensing*, 13, 866, <https://doi.org/10.3390/rs13050866>, 2021.
- Li, Z., Yang, D., Gao, B., Jiao, Y., Hong, Y., and Xu, T. : Multiscale Hydrologic Applications of the Latest Satellite Precipitation Products in the Yangtze River Basin using a Distributed Hydrologic Model, *Journal of Hydrometeorology*, 16, 407–426, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0105.1>, 2015.
- Liebmann, B. and Smith, C. A. : Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1275–1277, 1996.
- Lindroth, A. : Potential Evaporation—A Matter of Definition : A Comment on “Improvements of Runoff Models—What Way to Go?” *Hydrology Research*, 24, 359–364, 1993.
- Liu, J., Duan, Z., Jiang, J., and Zhu, A.-X. : Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China, *Advances in Meteorology*, 2015, e151239, <https://doi.org/10.1155/2015/151239>, 2015.
- MacQueen, J. : Some methods for classification and analysis of multivariate observations, in : *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 281–297, 1967.
- Makhlouf, Z. : Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres, Paris 11, 1994.
- Makhlouf, Z. and Michel, C. : A two-parameter monthly water balance model for French watersheds, *Journal of Hydrology*, 162, 299–318, 1994.
- Maldonado, T., Rutgersson, A., Alfaro, E., Amador, J., and Claremar, B. : Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures, *Advances in Geosciences*, 42, 35–50, 2016.
- Marcelin, L. H., Cela, T., and Shultz, J. M. : Haiti and the politics of governance and community responses to Hurricane Matthew, *Disaster Health*, 3, 151–161, <https://doi.org/10.1080/21665044.2016.1263539>, 2016.
- Marhaento, H., Booij, M. J., Rientjes, T. h. m., and Hoekstra, A. Y. : Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model, *Hydrological Processes*, 31, 2029–2040, <https://doi.org/10.1002/hyp.11167>, 2017.
- Martinez, C., Goddard, L., Kushnir, Y., and Ting, M. : Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean, *Clim Dyn*, 53, 825–846, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04616-4>, 2019.
- Mashingia, F., Mtalo, F., and Bruen, M. : Validation of remotely sensed rainfall over major climatic regions in Northeast Tanzania, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67–69, 55–63, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.013>, 2014.
- Massicotte, P., South, A., and Hufkens, K. : Rnaturalearth: World Map Data from Natural Earth, 2023.
- Mathevet, T., Gupta, H., Perrin, C., Andréassian, V., and Le Moine, N. : Assessing the performance and robustness of two conceptual rainfall-runoff models on a worldwide sample of watersheds, *Journal of Hydrology*, 585, 124698, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124698>, 2020.
- Mathieu, G. : Développement d'une méthodologie pour la cartographie du risque d'inondation : application à la rivière de Cavaillon en Haïti, Thèse de doctorat, UCL - Université Catholique de Louvain, 2023.
- Maurice, A. : La performance urbanistique sous la condition d'une réforme totale : Recherche visant un droit de l'urbanisme performant en Haïti, Thèse de doctorat, Poitiers, 2014.
- Mazzoleni, M., Brandimarte, L., and Amaranto, A. : Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 578, 124076, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124076>, 2019.

- Menne, M. J., Durre, I., Vose, R. S., Gleason, B. E., and Houston, T. G. : An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 897–910, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00103.1>, 2012.
- Misra, V., Li, H., and Kozar, M. : The precursors in the Intra-Americas Seas to seasonal climate variations over North America, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119, 2938–2948, 2014.
- Mompremier, R., Her, Y., Hoogenboom, G., and Song, J. : Effects of deforestation and afforestation on water availability for dry bean production in Haiti, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 325, 107721, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107721>, 2022.
- Monteleone, B., Bonaccorso, B., and Martina, M. : A joint probabilistic index for objective drought identification : The case study of Haiti, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 471–487, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-471-2020>, 2020.
- Moron, V., Frelat, R., Jean-Jeune, P. K., and Gaucherel, C. : Interannual and intra-annual variability of rainfall in Haiti (1905–2005), *Clim Dyn*, 45, 915–932, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2326-y>, 2015.
- Moron, V., Gourirand, I., and Taylor, M. : Weather types across the Caribbean basin and their relationship with rainfall and sea surface temperature, *Clim Dyn*, 47, 601–621, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2858-9>, 2016.
- Morton, F. I. : Evaporation research—a critical review and its lessons for the environmental sciences, *Critical reviews in environmental science and technology*, 24, 237–280, 1994.
- Mouelhi, S. : Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, PhD thesis, Doctorat Géosciences et ressources naturelles, ENGREF Paris, 2003.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., and Andréassian, V. : Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model, *Journal of Hydrology*, 318, 200–214, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>, 2006.
- Muñoz, E., Busalacchi, A. J., Nigam, S., and Ruiz-Barradas, A. : Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet, *Journal of Climate*, 21, 1260–1276, 2008.
- Musie, M., Sen, S., and Srivastava, P. : Comparison and evaluation of gridded precipitation datasets for streamflow simulation in data scarce watersheds of Ethiopia, *Journal of Hydrology*, 579, 124168, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124168>, 2019.
- Nandakumar, N. and Mein, R. G. : Uncertainty in rainfall—runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change, *Journal of hydrology*, 192, 211–232, 1997.
- Nascimento, N. O. : Appréciation à l’aide d’un modèle empirique des effets d’actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l’échelle d’un bassin versant, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1995.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., and Nobre, C. A. : HAND contour : A new proxy predictor of inundation extent, *Hydrological Processes*, 30, 320–333, <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>, 2016.
- Noncent, D. : Changement, tendance et variabilité climatique en Haïti durant les 1000 dernières années à partir des processus organo-minéraux du lac Azuei, Thèse de doctorat, Université Quisqueya (Port-au-Prince), 2023.
- Ooms, J. : *Curl: A Modern and Flexible Web Client for R*, 2023.
- Oriani, F., Stisen, S., Demirel, M. C., and Mariethoz, G. : Missing Data Imputation for Multisite Rainfall Networks : A Comparison between Geostatistical Interpolation and Pattern-Based Estimation on Different Terrain Types, *Journal of Hydrometeorology*, 21, 2325–2341, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0220.1>, 2020.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. : Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? : Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 303, 290–306, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>, 2005.
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R., and Gailhard, J. : The SCHADEX method : A semi-continuous rainfall–runoff simulation for extreme flood estimation, *Journal of Hydrology*, 495, 23–37, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.045>, 2013.
- Parmele, L. H. : Errors in output of hydrologic models due to errors in input potential evapotranspiration, *Water Resources Research*, 8, 348–359, 1972.
- Pearson, K. : LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *The London, Edinburgh,*

- and Dublin philosophical magazine and journal of science, 2, 559–572, 1901.
- Pebesma, E. : Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data, *The R Journal*, 10, 439–446, 2018.
- Pebesma, E. and Bivand, R. : *Spatial Data Science : With Applications in R*, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, 314 pp., <https://doi.org/10.1201/9780429459016>, 2023.
- Pelletier, A. and Andréassian, V. : Hydrograph separation : An impartial parametrisation for an imperfect method, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 1171–1187, <https://doi.org/10.5194/hess-24-1171-2020>, 2020.
- Pelling, M. and Uitto, J. I. : Small island developing states : Natural disaster vulnerability and global change, *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards*, 3, 49–62, <https://doi.org/10.3763/ehaz.2001.0306>, 2011.
- Perrin, C. : Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2000.
- Perrin, C. : Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative, *La Houille Blanche-Revue internationale de l’eau*, 84–91, 2002.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. : Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 279, 275–289, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7), 2003.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. : Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), 2007.
- Peterson, T. C., Taylor, M. A., Demeritte, R., Duncombe, D. L., Burton, S., Thompson, F., Porter, A., Mercedes, M., Villegas, E., Fils, R. S., Tank, A. K., Martis, A., Warner, R., Joyette, A., Mills, W., Alexander, L., and Gleason, B. : Recent changes in climate extremes in the Caribbean region, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 107, ACL 16-1-ACL 16-9, <https://doi.org/10.1029/2002JD002251>, 2002.
- Pickands, J. : Statistical Inference Using Extreme Order Statistics, *The Annals of Statistics*, 3, 119–131, 1975.
- Pierce, D. : Ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files, 2023.
- Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., and Berthier, E. : EXZECO : A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods, in : 9th International Conference on Hydroinformatics, Tianjin, CHINA, 2010.
- Pouyaud, B. and Hoepffner, M. : Rapport d’expertise hydrologique : appui au Service National des Ressources en Eau de la République d’Haïti, ORSTOM, Centre ORSTOM Montpellier, 1987.
- Pradhan, A., Nair, A. S., Indu, J., and Kirstetter, P.-E. : Impact of sampling of GPM orbital data on streamflow simulations, *Journal of Hydrology*, 593, 125798, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125798>, 2021.
- Pradhan, R. K., Markonis, Y., Vargas Godoy, M. R., Villalba-Pradas, A., Andreadis, K. M., Nikolopoulos, E. I., Papalexioiu, S. M., Rahim, A., Tapiador, F. J., and Hanel, M. : Review of GPM IMERG performance : A global perspective, *Remote Sensing of Environment*, 268, 112754, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112754>, 2022.
- Prakash, S. : Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India, *Journal of Hydrology*, 571, 50–59, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.036>, 2019.
- Prescott, P. and Walden, A. T. : Maximum likelihood estimation of the parameters of the generalized extreme-value distribution, *Biometrika*, 67, 723–724, 1980.
- R Core Team : *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.
- Rahman, Md. S. and Di, L. : The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management, *Nat Hazards*, 85, 1223–1248, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2601-9>, 2017.
- Ramos-Scharrón, C. E. and Arima, E. : Hurricane María’s Precipitation Signature in Puerto Rico : A Conceivable Presage of Rains to Come, *Sci Rep*, 9, 15612, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52198-2>, 2019.
- Ramos-Scharrón, C. E., Garnett, C. T., and Arima, E. Y. : A Catalogue of Tropical Cyclone Induced Instantaneous Peak Flows Recorded in Puerto Rico and a Comparison with the World’s Maxima, *Hydrology*, 8, 84, <https://doi.org/10.3390/hydrology8020084>, 2021.
- Rebolho, C. : Modélisation conceptuelle de l’aléa inondation à l’échelle du bassin versant, Thèse de doctorat, Paris, AgroParisTech, 2018.
- Réménieras, G. and Boyer, J. : Monographie Hydrologique du bassin de la Maronne, La Houille Blanche,

- 102–124, 1950.
- Ren, X., Hong, N., Li, L., Kang, J., and Li, J. : Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process, *Geoderma*, 363, 114158, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114158>, 2020.
- Reuter, H. I., Nelson, A., and Jarvis, A. : An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographical Information Science*, 21, 983–1008, <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>, 2007.
- Ribstein, P. : Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel, Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, France, 1990.
- Rohde, R., Muller, R. A., Jacobsen, R., Muller, E., Perlmutter, S., Rosenfeld, A., Wurtele, J., Groom, D., and Wickham, C. : A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinfor Geostat : An Overview 1 : 1*, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4172/2327-4581.1000101>, 2013.
- Roussel, J.-R., Barber, C. B., Habel, K., Grasman, R., Gramacy, R. B., Mozharovskyi, P., and Sterratt, D. C. : *Geometry: Mesh Generation and Surface Tessellation*, 2023.
- Saemian, P., Hosseini-Moghari, S.-M., Fatehi, I., Shoarinezhad, V., Modiri, E., Tourian, M. J., Tang, Q., Nowak, W., Bárdossy, A., and Sneeuw, N. : Comprehensive evaluation of precipitation datasets over Iran, *Journal of Hydrology*, 603, 127054, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127054>, 2021.
- Sáenz, F. and Durán-Quesada, A. M. : A climatology of low level wind regimes over Central America using a weather type classification approach, *Frontiers in Earth Science*, 3, <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00015>, 2015.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H., Juang, H.-M. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Delst, P. V., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Dool, H. van den, Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., and Goldberg, M. : The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015–1058, <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>, 2010.
- Sahin, V. and Hall, M. J. : The effects of afforestation and deforestation on water yields, *Journal of Hydrology*, 178, 293–309, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02825-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02825-0), 1996.
- Salomon, W., Useni Sikuzani, Y., Sambieni, K. R., Kouakou, A. T. M., Barima, Y. S. S., Théodat, J. M., and Bogaert, J. : Land Cover Dynamics along the Urban–Rural Gradient of the Port-au-Prince Agglomeration (Republic of Haiti) from 1986 to 2021, *Land*, 11, 355, <https://doi.org/10.3390/land11030355>, 2022.
- Schauberger, P., Walker, A., Braglia, L., Sturm, J., Garbuszus, J. M., and Barbone, J. M. : *Openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files*, 2023.
- Scherer, J. : Great earthquakes in the island of Haiti, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2, 161–180, 1912.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., and Rudolf, B. : GPCC’s new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle, *Theor Appl Climatol*, 115, 15–40, <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>, 2014.
- Sevruk, B., Ondrás, M., and Chvíla, B. : The WMO precipitation measurement intercomparisons, *Atmospheric Research*, 92, 376–380, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.016>, 2009.
- Sharif, R. B., Habib, E. H., and ElSaadani, M. : Evaluation of Radar-Rainfall Products over Coastal Louisiana, *Remote Sensing*, 12, 1477, <https://doi.org/10.3390/rs12091477>, 2020.
- Sharifi, E., Eitzinger, J., and Dorigo, W. : Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain : A Regional Study over Austria, *Remote Sensing*, 11, 2018, <https://doi.org/10.3390/rs11172018>, 2019.
- Shultz, J. M., Cela, T., Marcelin, L. H., Espinola, M., Heitmann, I., Sanchez, C., Jean Pierre, A., Foo, C. Y., Thompson, K., Klotzbach, P., Espinel, Z., and Rechkemmer, A. : The trauma signature of 2016 Hurricane Matthew and the psychosocial impact on Haiti, *Disaster Health*, 3, 121–138, <https://doi.org/10.1080/21665044.2016.1263538>, 2016.
- Sievert, C. : *Interactive web-based data visualization with R, plotly, and shiny*, 2019.
- Slivinski, L. C., Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Giese, B. S., McColl, C., Allan, R., Yin, X., Vose, R., Titchner, H., Kennedy, J., Spencer, L. J., Ashcroft, L., Brönnimann, S., Brunet, M.,

- Camuffo, D., Cornes, R., Cram, T. A., Crouthamel, R., Domínguez-Castro, F., Freeman, J. E., Gergis, J., Hawkins, E., Jones, P. D., Jourdain, S., Kaplan, A., Kubota, H., Blancq, F. L., Lee, T.-C., Lorrey, A., Luterbacher, J., Maugeri, M., Mock, C. J., Moore, G. W. K., Przybylak, R., Pudmenzky, C., Reason, C., Slonosky, V. C., Smith, C. A., Tinz, B., Trewin, B., Valente, M. A., Wang, X. L., Wilkinson, C., Wood, K., and Wyszyński, P. : Towards a more reliable historical reanalysis : Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 2876–2908, <https://doi.org/10.1002/qj.3598>, 2019.
- Slowikowski, K., Schep, A., Hughes, S., Dang, T. K., Lukauskas, S., Irisson, J.-O., Kamvar, Z. N., Ryan, T., Christophe, D., Hiroaki, Y., Gramme, P., Abdol, A. M., Barrett, M., Cannoodt, R., Krassowski, M., Chirico, M., Aphalo, P., and Barton, F. : Ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with 'Ggplot2', 2024.
- Smith, K. A., Barker, L. J., Tanguy, M., Parry, S., Harrigan, S., Legg, T. P., Prudhomme, C., and Hannaford, J. : A multi-objective ensemble approach to hydrological modelling in the UK : An application to historic drought reconstruction, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 3247–3268, <https://doi.org/10.5194/hess-23-3247-2019>, 2019.
- Smith, R. B., Minder, J. R., Nugent, A. D., Storelmo, T., Kirshbaum, D. J., Warren, R., Lareau, N., Palany, P., James, A., and French, J. : Orographic Precipitation in the Tropics : The Dominica Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1567–1579, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00194.1>, 2012.
- Smith, R. L. : Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases, *Biometrika*, 72, 67–90, 1985.
- South, A. : Rnaturalearthdata: World Vector Map Data from Natural Earth Used in 'rnaturalearth', 2017.
- South, A. and Michael, S. : High Resolution World Vector Map Data from Natural Earth used in rnaturalearth, 2024.
- Stampoulis, D. and Anagnostou, E. N. : Evaluation of Global Satellite Rainfall Products over Continental Europe, *Journal of Hydrometeorology*, 13, 588–603, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-086.1>, 2012.
- Stennett-Brown, R. K., Stephenson, T. S., and Taylor, M. A. : Caribbean climate change vulnerability : Lessons from an aggregate index approach, *PLOS ONE*, 14, e0219250, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219250>, 2019.
- Stephenson, A. and Ferro, C. : Evd: Functions for Extreme Value Distributions, 2022.
- Stephenson, T. S., Vincent, L. A., Allen, T., Van Meerbeeck, C. J., McLean, N., Peterson, T. C., Taylor, M. A., Aaron-Morrison, A. P., Auguste, T., Bernard, D., Boekhoudt, J. R. I., Blenman, R. C., Braithwaite, G. C., Brown, G., Butler, M., Cumberbatch, C. J. M., Etienne-Leblanc, S., Lake, D. E., Martin, D. E., McDonald, J. L., Ozoria Zaruela, M., Porter, A. O., Santana Ramirez, M., Tamar, G. A., Roberts, B. A., Sallons Mitro, S., Shaw, A., Spence, J. M., Winter, A., and Trotman, A. R. : Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961–2010, *International Journal of Climatology*, 34, 2957–2971, <https://doi.org/10.1002/joc.3889>, 2014.
- Strohmenger, L., Sauquet, E., Bernard, C., Bonneau, J., Branger, F., Bresson, A., Brigode, P., Buzier, R., Delaigue, O., Devers, A., Evin, G., Fournier, M., Hsu, S.-C., Lanini, S., de Lavenne, A., Lemaitre-Basset, T., Magand, C., Mendoza Guimarães, G., Mentha, M., Munier, S., Perrin, C., Podechard, T., Rouchy, L., Sadki, M., Soutif-Bellenger, M., Tilmant, F., Trambly, Y., Véron, A.-L., Vidal, J.-P., and Thirel, G. : On the visual detection of non-natural records in streamflow time series : Challenges and impacts, *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 3375–3391, <https://doi.org/10.5194/hess-27-3375-2023>, 2023.
- Styron, R., García-Pelaez, J., and Pagani, M. : CCAF-DB : The Caribbean and Central American active fault database, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 831–857, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-831-2020>, 2020.
- Sultana, R. and Nasrollahi, N. : Evaluation of remote sensing precipitation estimates over Saudi Arabia, *Journal of Arid Environments*, 151, 90–103, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.11.002>, 2018.
- Symithe, S. J., Calais, E., Haase, J. S., Freed, A. M., and Douilly, R. : Coseismic Slip Distribution of the 2010 M 7.0 Haiti Earthquake and Resulting Stress Changes on Regional Faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2326–2343, <https://doi.org/10.1785/0120120306>, 2013.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., and Iwasaki, A. : Characteristics of ASTER GDEM version 2, in : 2011 IEEE international geoscience and remote sensing symposium, 3657–3660, 2011.
- Tan, M. L. and Santo, H. : Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia, *Atmospheric Research*, 202, 63–76, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>, 2018.

- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Duan, Z., Cracknell, A. P., and Chaplot, V. : Evaluation of Six High-Resolution Satellite and Ground-Based Precipitation Products over Malaysia, *Remote Sensing*, 7, 1504–1528, <https://doi.org/10.3390/rs70201504>, 2015.
- Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., and Hong, Y. : Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets, *Remote Sensing of Environment*, 240, 111697, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>, 2020.
- Tang, X., Zhang, J., Gao, C., Ruben, G. B., and Wang, G. : Assessing the Uncertainties of Four Precipitation Products for Swat Modeling in Mekong River Basin, *Remote Sensing*, 11, 304, <https://doi.org/10.3390/rs11030304>, 2019.
- Tarboton, D. G., Watson, D. W., Wallace, R., Schreuders, K. A. T., and Neff, J. : Terrain Analysis Using Digital Elevation Models, 48, 2005.
- Tardieu, F. X. L., Moine, A., and Faure, J.-F. : Analyse des impacts de l'ouragan Mathieu par télédétection : Zoom sur la végétation et l'urbain dans le Sud d'Haïti, 2018.
- Tarter, A., Freeman, K. K., Ward, C., Sander, K., Theus, K., Coello, B., Fawaz, Y., Miles, M., and Ahmed, T. T. G. : Charcoal in Haiti : A National Assessment of Charcoal Production and Consumption Trends, World Bank, Washington, DC, <https://doi.org/10.1596/31257>, 2018.
- Taylor, M. A., Enfield, D. B., and Chen, A. A. : Influence of the tropical Atlantic versus the tropical Pacific on Caribbean rainfall, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 107, 10-1-10-14, <https://doi.org/10.1029/2001JC001097>, 2002.
- Terrier, M., Bialkowski, A., Nachbaur, A., Prépétit, C., and Joseph, Y. F. : Revision of the geological context of the Port-au-Prince metropolitan area, Haiti : Implications for slope failures and seismic hazard assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2577–2587, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2577-2014>, 2014.
- Terrier, M., Rançon, J.-P., Bertil, D., Chêne, F., Desprats, J.-F., Lecacheux, S., Le Roy, S., Stollsteiner, P., Bouc, O., and Raynal, M. : Atlas des menaces naturelles en Haïti, 2017.
- Teutschbein, C. and Seibert, J. : Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies : Review and evaluation of different methods, *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>, 2012.
- Thebe, B. : République d'Haïti : Projet d'appui au service national des ressources en eau, ORSTOM, Centre ORSTOM Montpellier, 1990.
- Thorncroft, C. and Hodges, K. : African Easterly Wave Variability and Its Relationship to Atlantic Tropical Cyclone Activity, *J. Climate*, 14, 1166–1179, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C1166:AEWVAI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C1166:AEWVAI%3E2.0.CO;2), 2001.
- Toma, V. E. and Webster, P. J. : Oscillations of the intertropical convergence zone and the genesis of easterly waves. Part I : Diagnostics and theory, *Clim Dyn*, 34, 587–604, <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0584-x>, 2010.
- Torres-Sierra, H. : Flood of January 5-6, 1992, in Puerto Rico, US Department of the Interior, US Geological Survey, 1996.
- Tramblay, Y., Rouché, N., Paturel, J.-E., Mahé, G., Boyer, J.-F., Amoussou, E., Bodian, A., Dacosta, H., Dakhlaoui, H., Dezetter, A., Hughes, D., Hanich, L., Peugeot, C., Tshimanga, R., and Lachassagne, P. : ADHI : The African Database of Hydrometric Indices (1950–2018), *Earth System Science Data*, 13, 1547–1560, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1547-2021>, 2021.
- Turner, R. : Deldir: Delaunay Triangulation and Dirichlet (Voronoi) Tessellation, 2023.
- Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., and Kawasaki, Z.-I. : A Kalman Filter Approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from Combined Passive Microwave and Infrared Radiometric Data, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 87A, 137–151, <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>, 2009.
- Vila, D. A., de Goncalves, L. G. G., Toll, D. L., and Rozante, J. R. : Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America, *J. Hydrometeor.*, 10, 533–543, <https://doi.org/10.1175/2008JHM1048.1>, 2009.
- Villarini, G., Mandapaka, P. V., Krajewski, W. F., and Moore, R. J. : Rainfall and sampling uncertainties : A rain gauge perspective, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113, <https://doi.org/10.1029/2007JD009214>, 2008.

- Viney, N. R. and Bates, B. C. : It never rains on Sunday : The prevalence and implications of untagged multi-day rainfall accumulations in the Australian high quality data set, *International Journal of Climatology*, 24, 1171–1192, <https://doi.org/10.1002/joc.1053>, 2004.
- Wang, C. : Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate, *Clim Dyn*, 29, 411–422, <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>, 2007.
- Wang, C. and Enfield, D. B. : The tropical Western Hemisphere warm pool, *Geophysical research letters*, 28, 1635–1638, 2001.
- Wang, C. and Enfield, D. B. : A Further Study of the Tropical Western Hemisphere Warm Pool, *J. Climate*, 16, 1476–1493, <https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.10.1476>, 2003.
- Wang, C. and Lee, S. : Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes, *Geophysical Research Letters*, 34, <https://doi.org/10.1029/2006GL028579>, 2007.
- Wang, C., Enfield, D. B., Lee, S., and Landsea, C. W. : Influences of the Atlantic warm pool on Western Hemisphere summer rainfall and Atlantic hurricanes, *Journal of Climate*, 19, 3011–3028, 2006.
- Wang, C., Lee, S.-K., and Enfield, D. B. : Climate response to anomalously large and small Atlantic warm pools during the summer, *Journal of Climate*, 21, 2437–2450, 2008.
- Wang, C., Si, J., Zhao, C., Jia, B., Celestin, S., Li, D., He, X., Zhou, D., Qin, J., and Zhu, X. : Adequacy of satellite derived data for streamflow simulation in three Hexi inland river basins, Northwest China, *Atmospheric Research*, 274, 106203, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106203>, 2022.
- Wannasin, C., Brauer, C. C., Uijlenhoet, R., van Verseveld, W. J., and Weerts, A. H. : Daily flow simulation in Thailand Part I : Testing a distributed hydrological model with seamless parameter maps based on global data, *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 34, 100794, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100794>, 2021.
- White, T. A. and Runge, C. F. : Common Property and Collective Action : Lessons from Cooperative Watershed Management in Haiti, *Economic Development and Cultural Change*, 43, 1–41, <https://doi.org/10.1086/452134>, 1994.
- Whitworth, M. R. Z., Giardina, G., Penney, C., Di Sarno, L., Adams, K., Kijewski-Correa, T., Black, J., Foroughnia, F., Macchiarulo, V., Milillo, P., Ojaghi, M., Orfeo, A., Pugliese, F., Dönmez, K., Aktas, Y. D., and Macabuag, J. : Lessons for Remote Post-earthquake Reconnaissance from the 14 August 2021 Haiti Earthquake, *Frontiers in Built Environment*, 8, 2022.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., and Yutani, H. : Welcome to the Tidyverse, *Journal of Open Source Software*, 4, 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>, 2019.
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., Posit, and PBC : *Ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*, 2023a.
- Wickham, H., Bryan, J., Posit, attribution), P. (Copyright. holder of all R. code and all C. code without explicit copyright, code), M. K. (Author. of included R., code), K. V. (Author. of included libxls, code), C. L. (Author. of included libxls, code), B. C. (Author. of included libxls, code), D. H. (Author. of included libxls, and code), E. M. (Author. of included libxls : Readxl: Read Excel Files, 2023b.
- Wilke, C. O. : *Cowplot: Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for 'Ggplot2'*, 2023.
- Wright, D., Li, Z., and Booth, E. : Using Stochastic Storm Transposition to Update Rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves for the Coon Creek and West Fork Kickapoo Watersheds, 2020a.
- Wright, D. B., Smith, J. A., Villarini, G., and Baeck, M. L. : Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition, *Journal of Hydrology*, 488, 150–165, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.003>, 2013.
- Wright, D. B., Mantilla, R., and Peters-Lidard, C. D. : A remote sensing-based tool for assessing rainfall-driven hazards, *Environmental Modelling & Software*, 90, 34–54, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.12.006>, 2017.
- Wright, D. B., Yu, G., and England, J. F. : Six decades of rainfall and flood frequency analysis using stochastic storm transposition : Review, progress, and prospects, *Journal of Hydrology*, 585, 124816, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124816>, 2020b.
- Wuertz, D., Setz, T., Chalabi, Y., and Northrop, P. J. : *fExtremes: Rmetrics - Modelling Extreme Events in Finance*, 2023.

- Wyart, P. : Monographie Hydrologique du Guil, affluent de la Durance, La Houille Blanche, 247–263, 1950.
- Xie, Y., Dervieux, C., and Riederer, E. : R Markdown Cookbook, 2023a.
- Xie, Y., Allaire, J., and Grolemond, G. : R Markdown: The Definitive Guide, 2023b.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G. : The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, *Hydrological Processes*, 16, 1807–1829, <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>, 2002.
- Zhang, C. : Double ITCZs, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 106, 11785–11792, <https://doi.org/10.1029/2001JD900046>, 2001.
- Zheng, X., Maidment, D. R., Tarboton, D. G., Liu, Y. Y., and Passalacqua, P. : GeoFlood : Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis, *Water Resources Research*, 54, 10, 013–10, 033, <https://doi.org/10.1029/2018WR023457>, 2018.