UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

# Détection des changements de la probabilité des extrêmes de précipitations dans le climat futur du Burundi

**Nsabimana, Fidèle; Sous la direction de : Dr Célestin Manirakiza**

**2024-05**
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2034

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
CENTRE DE RECHERCHE EN MATHEMATIQUES ET PHYSIQUE

# Détection des changements de la probabilité des extrêmes de précipitations dans le climat futur du Burundi

Par :

**Fidèle NSABIMANA**

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Physiques Fondamentales.

**Sous la direction de :**
**Dr Célestin MANIRAKIZA** : Directeur de mémoire
**Dr René SIMBIZI** : Co-Directeur de mémoire

**Bujumbura, Mai 2024**

# Composition du Jury

Pr Sébastien NIYONZIMA (*Président*)

Dr Salomon MUGISHA (*Secrétaire*)

Dr Célestin MANIRAKIZA (*Directeur*)
Dr René SIMBIZI (*Co-Directeur*)

# Dédicace

A mes parents ;

A mes frères et sœurs ;

A mes camarades de master ;

A tous ceux qui me sont chers.

# Remerciements

*Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail de longue haleine qui n'aurait pas été possible sans le soutien de mon entourage. C'est un grand honneur d'évoluer aux côtés des gens si passionnés et inspirants.*

*Tout d'abord, un immense remerciement à mon Directeur de mémoire Dr Célestin MANIRAKIZA pour son encadrement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de mon projet. Merci de m'avoir permis de présenter ce projet à travers le monde et de cheminer tout au long de notre collaboration. Ensuite, je tiens à remercier Dr René SIMBIZI, qui a été mon enseignant de Master et a accepté d'être mon Co-directeur de mémoire, pour son aide durant ma maîtrise et pour ses commentaires pertinents lors de l'élaboration du mémoire. Leur rigueur scientifique, leur critique pertinente, leur temps précieux, leur esprit de créativité, ont guidé mes pas dans le domaine de la recherche en physique fondamentale. Qu'ils sachent que nous partageons le fruit des éfforts fournis.*

*Je souhaite également dire merci à ma famille et mes amis pour tous les encouragements. Je ne peux exprimer toute la gratitude que j'ai à l'égard de mes parents, qui me supportent depuis le tout début et qui m'inspirent par leurs actions.*

*Mes remerciements s'adressent à tous mes enseignants, plus particulièrement ceux du Master pour nous avoir légué une bonne formation scientifique. Je leur serai toujours reconnaissant. Mes derniers remerciements s'adressent également à tous mes camarades étudiants de Master physique pour leur collaboration au cours du cursus de formation.*

# Résumé

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont visibles et entraînent des effets néfastes dans le monde et au Burundi en particulier à cause du changement climatique.

Dans ce contexte, nous avons mené une étude sur les précipitations extrêmes au Burundi. L'objectif visé étant de détecter la probabilité d'occurrence des extrêmes rares dans le climat futur du Burundi sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$. Notre étude a utilisé les précipitations journalières observées sur la période $1981-2020$ et cinq modèles climatiques de CMIP6 dont les simulations futures suivent le scénario $SSP5-8.5$. La théorie des Valeurs Extrêmes Généralisées a été utilisée pour déterminer les paramètres d'ajustement pour les indices de précipitations extrêmes ($Rx1day$, $Rx3day$, $Rx5day$) dans le climat actuel et futur. En plus, le rapport de risques $RR$ pour quantifier les changements de probabilités d'occurrence des futures événements extrêmes est aussi utilisé.

Les résultats indiquent des changements de probabilités des précipitations extrêmes pour les deux périodes futures. En effet, les changements de mode des distributions (paramètre de localisation $\mu$) montrent une augmentation dans la grande partie du pays pour les trois indices et pour les deux périodes futures. Quant à la variabilité des extrêmes (paramètre d'échelle $\sigma$), les tendances à l'augmentation dominent celles à la diminution sauf dans la partie Nord-Est pour les trois indices et sur les deux périodes. En outre, les changements de la queue de la distribution (paramètre de forme $\xi$) montrent des tendances au rétrécissement de la queue dans certaines régions tandis que d'autres ont des tendances au rallongement de la queue pour les trois indices et sur les deux périodes.

En définitive, sur la période $2021-2060$, la moyenne des $RR$ prévoit une légère augmentation du risque d'inondation pour les indices $Rx1day$ et $Rx3day$ mais ne prévoit aucun changement pour l'indice $Rx5day$ sur l'ensemble du Burundi. D'autre part, sur la période $2061-2100$, il est prévu une légère diminution du risque d'inondation pour les indices $Rx1day$ et $Rx3day$ et une légère augmentation du risque d'inondation pour l'indice $Rx1day$.

Ainsi, ces résultats pourront servir de référence aux études ultérieures et aider les décideurs et autres agents de la société à prendre des orientations adéquates.

**Les mots clés** : probabilité, précipitations, changement climatique , Burundi.

# Abstract

Extreme weather phenomena are visible and have harmful effects around the globe, and particularly in Burund because of climate change.

In this context, we carried out a study of extreme precipitation events in Burundi. The aim was to detect the probability of occurrence of extreme events in Burundi's future climate over $2021-2060$ and $2061-2100$ periods. Our study used daily rainfall data collected over the period $1981-2020$ and five CMIP6 climate models whose future simulations follow $SSP5-8.5$ scenario. Generalized Extreme Value theory was used to determine the fit parameters for the extreme precipitation indices ($Rx1day$, $Rx3day$, $Rx5day$) in the current and future climate. In addition, the Risk ratio $RR$ for quantifying the probability of occurrence of future extreme events is also used.

The results indicate changes in the probability of extreme precipitation for both periods. In fact, the changes in the mode of the distributions (position parameter $\mu$) show an increase over most of the country for the three indices and for both periods. For the variability of extremes (scale parameter $\sigma$), increasing trends dominate decreasing ones except in the North-East for the three indices and for both periods. In addition, changes in the tails of the distribution (parameter $\xi$) show tail shortening trends in some regions, while others have tail lengthening trends for the three indices over both periods.

Finaly, over the period $2021-2060$, the average RR forecasts a slight increase in the risk of flooding for indices $Rx1day$ and $Rx3day$, but no change for the $Rx5day$ index over Burundi as whole. On the other hand, over the period $2061-2100$, a slight decrease in the risk of flooding is forecast for the $Rx1day$ and $Rx3day$ indices and a slight increase in the risk of flooding for the $Rx1day$ index.

Thus, these results can serve as a reference for subsequent studies and help decision-makers and other agents of society to take appropriate directions.

**Key words** : probability, precipitation, climate change, Burundi.

# Table des matières

**Composition du Jury** i

**Dédicace** ii

**Remerciements** iii

**Résumé** iv

**Abstract** v

**Table des matières** vi

**Liste des tableaux** x

**Liste des figures** xi

**Liste des sigles et abréviations** xiii

**Avant-propos** xvi

**1 Introduction générale** 1

1.1 Contexte . . . . . 1

1.2 Justification de l'étude . . . . . 2

1.3 Revue de la littérature . . . . . 3

1.3.1 Changement climatique et événements extrêmes dans le monde . . . 3

1.3.2 Changement climatique et événements extrêmes au Burundi . . . . 4

1.4 Questions de recherche sur le Burundi . . . . . 6

1.5 Objectif de l'étude . . . . . 7

1.5.1 Objectif principal . . . 7
1.5.2 Objectifs spécifiques . . . 7
1.6 Hypothèse de recherche . . . 7
1.7 Contribution de l'étude . . . 8
1.8 Limite de l'étude . . . 8
1.9 Résultats attendus et bénéficiaires . . . 9
1.10 Articulation de l'étude . . . 9

**2 Description du lieu et du paramètre atmosphérique d'étude 10**
2.1 Description du lieu d'étude . . . 10
2.1.1 Localisation géographique . . . 10
2.1.2 Le relief . . . 11
2.1.3 L'hydrologie . . . 12
2.1.4 Le climat . . . 12
2.1.5 La population et ses principales activités . . . 13
2.1.5.1 La population . . . 13
2.1.5.2 Les activités socio-économiques . . . 14
2.2 Description du paramètre atmosphérique d'étude . . . 15
2.2.1 Eau de pluie . . . 15
2.2.2 Microphysique de la pluie . . . 16
2.3 Conclusion . . . 17

**3 Données, matériels et méthodologie utilisés 18**
3.1 Les données utilisées et leur source . . . 18
3.1.1 Les données météorologiques observées . . . 18
3.1.2 Les données pluviométriques CHIRPS . . . 19
3.1.3 Performance des données CHIRPS sur le Burundi . . . 20
3.1.3.1 Evaluation de la performance sur base des précipitations mensuelles . . . 20
3.1.3.2 Evaluation de la performance sur base des paramètres statistiques . . . 21
3.1.4 Les modèles climatiques de CMIP6 . . . 23

3.1.5 Les scénarios climatiques du CMIP6 . . . 25
3.1.6 La correction des biais des modèles climatiques . . . 26
3.1.6.1 La Quantile Delta mapping (QDM) . . . 27
3.1.6.2 Le diagramme de Taylor . . . 28
3.2 Matériels utilisés . . . 28
3.2.1 Logiciel R . . . 29
3.2.2 Logiciel Quantum Geographic Information System (QGIS) . . . 30
3.2.3 Logiciel Climate Data Operator (CDO) . . . 30
3.2.4 Logiciel ClimaPact2 . . . 30
3.3 Méthodes . . . 31
3.3.1 Choix et calcul des indices climatiques . . . 31
3.3.2 Loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) . . . 32
3.3.2.1 Modèle des maxima par blocs (BM) . . . 32
3.3.2.2 Estimation des paramètres de GEV . . . 34
3.3.2.3 Projection des changements futurs . . . 35
3.3.2.4 Rapport de risque (RR) . . . 35
3.3.3 Interpolation spatiale . . . 36
3.4 Conclusion . . . 36

**4 Résultats, interprétation et discussion 37**

4.1 Présentation et interprétation des résultats . . . 37
4.1.1 La distribution spatiale des paramètres de GEV pour les extrêmes (les maxima) de précipitations sur la période actuelle . . . 37
4.1.2 Projection des changements futurs des extrêmes de précipitations sur la période 2021-2060 . . . 41
4.1.2.1 Les changements du paramètre de position $\mu$ dans le futur proche . . . 41
4.1.2.2 Les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ dans le futur proche . . . 44
4.1.2.3 Les changements du paramètre de forme $\xi$ dans le futur proche . . . 46
4.1.3 Projection des changements futurs des extrêmes de précipitations sur la période 2061-2100 . . . 50

4.1.3.1 Les changements du paramètre de position $\mu$ dans le futur lointain . . . 50
4.1.3.2 Les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ dans le futur lointain . . . 53
4.1.3.3 Les changements du paramètre de forme $\xi$ dans le futur lointain . . . 56
4.1.4 Changements futurs de la probabilité des extrêmes de précipitations 59
4.1.5 Prédiction de la distribution spatiale des changements de la probabilité des extrêmes de précipitations . . . 61
4.1.5.1 Distribution spatiale de $RR$ sur la période 2021-2060 . . . 61
4.1.5.2 Distribution spatiale de $RR$ sur la période $2061 - 2100$ . . . 64
4.2 Discussion des résultats . . . 67
4.3 Conclusion . . . 69

**5 Conclusion générale, recommandations et perspectives 70**
5.1 Conclusion générale . . . 70
5.2 Recommandations . . . 71
5.3 Perspectives . . . 72

**Bibliographie 73**

# Liste des tableaux

1.1 Dépenses allouées aux dommages d'infrastructures suite aux inondations du 9 au 10 Février 2014 en Maire de Bujumbura [PNPRGC, 2014] . . . . . 5

3.1 Liste des stations climatologiques utilisées . . . . . 19

3.2 Comparaison des principales mesures statistiques utilisées pour évaluer la performance des données maillées moyennées sur 34 ans, de 1983 à 2016. . 23

3.3 Liste des modèles CMIP6 utilisés [Ayugi *et al.*, 2021a] . . . . . 25

3.4 Indices climatiques calculés . . . . . 31

4.1 Les rapports de risque (RR) d'inondation sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$. . . . . 61

# Liste des figures

1.1 Inondations en Mairie de Bujumbura le 9 Février 2014 . . . . . 6

2.1 Localisation du lieu d'étude . . . . . 11

3.1 Les précipitations mensuelles pour les six régions calculées en moyenne sur une période de 34 ans, (de 1983 à 2016) . . . . . 21

3.2 Evaluation des cinq modèles avant la correction de biais. . . . . 29

3.3 Evaluation des cinq modèles après la correction de biais. . . . . 29

4.1 Distribution spatiale du paramètre de position $\mu$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020 . . . . . 38

4.2 Distribution spatiale du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020 . . . . . 39

4.3 Distribution spatiale du paramètre de forme $\xi$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020 . . . . . 40

4.4 Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx1day sur la période 2021 − 2060 . . . . . 41

4.5 Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx3day sur la période 2021 − 2060 . . . . . 43

4.6 Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx5day sur la période 2021 − 2060 . . . . . 44

4.7 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx1day sur la période 2021 − 2060 45

4.8 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx3day sur la période 2021 − 2060 46

4.9 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx5day sur la période 2021 − 2060 47

4.10 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx1day sur la période 2021 − 2060 48

4.11 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx3day sur la période 2021 − 2060 49

4.12 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx5day sur la période 2021 − 2060 50

4.13 Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx1day (2061-2100) 51
4.14 Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx3day (2061-2100) 52
4.15 Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx5day (2061-2100) 53
4.16 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx1day (2061-2100) . . 54
4.17 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx3day (2061-2100) . . 55
4.18 Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx5day (2061-2100) . . 56
4.19 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx1day (2061-2100) . . 57
4.20 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx3day (2061-2100) . . 58
4.21 Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx5day (2061-2100) . . 59
4.22 Rapport de risque pour l'indice $Rx1day$ (2021-2060) . . . . . 62
4.23 Rapport de risque pour l'indice $Rx3day$ (2021-2060) . . . . . 63
4.24 Rapport de risque pour l'indice $Rx5day$ (2021-2060) . . . . . 64
4.25 Rapport de risque pour l'indice $Rx1day$ (2061-2100) . . . . . 65
4.26 Rapport de risque pour l'indice $Rx3day$ (2061-2100) . . . . . 66
4.27 Rapport de risque pour l'indice $Rx5day$ (2061-2100) . . . . . 67

# Liste des sigles et abréviations

- BMM : Bloc Maxima Method
- CC : Coefficient de corrélation
- CDF : Fonction de distribution Cumulative
- CDO : Climate Data Operator
- CHIRPS : Climate Hazards Infrared Precipitation with Station observation
- CMIP : Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés
- CRU : Climate Research Unit
- EQM : Erreur Quadratique Moyenne
- EMV : Estimation par le Maximum de Vraisemblance
- ET-SCI : Expert Team Climate Sector Indices
- FAO : Food and Agriculture Organization
- FNUAP : Fonds des Nations Unies pour la population
- GEV : Valeurs Extrêmes Généralisées
- GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat
- GIZ : Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
- IDWA : Inverse Distance Weighted Averaging
- IGEBU : Institut Géographique du Burundi
- *iid* : indépendante identiquement distribuée

- IPCC : Intergouvernemental Panel on Climate Change
- ISTEEBU : Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé
- ONU : Organisation de Nations Unies
- MAE : Erreur Absolue Moyenne
- MATTE : Ministère de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de l'Environnement
- MCG : Modèles de Circulation Générale
- MCR : Modèles Climatiques Régionaux
- MEAE : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage
- MEEATU : Ministère de l'eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme
- MEI : Modèles d'Evaluation Intégrée
- MME : Moyenne d'Ensemble Multimodèle
- MST : Modèles du Système Terrestre
- PDF : Fonction densité de probabilité
- PERSIANN-CDR : Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record
- PMRC : Progamme Mondial de Recherche sur le Climat
- PNPRGC : Plateforme Nationale de Prévention des Risques et de Gestion des Catastrophes
- QDM : Quantile Delta mapping
- QGIS : Quantum Geographic Information System
- RR : Rapport de Risque

- SSP : Shared Socio-economic Pathways
- SIG : Logiciel d'Information Géographique
- SD : Statistical Downscaling
- SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- STD : Standard deviation
- US : United States

# Avant-propos

L'enseignement universitaire conduisant au grade de master prévoit un travail de fin d'études. Le présent mémoire donne l'accès au diplôme de Master en sciences physiques fondamentales. Depuis des années, les questions relatives aux événements climatiques extrêmes ont fait régulièrement l'objet de travaux de la part de nombreux chercheurs. Les mêmes questions suscitent notre esprit à mener une étude sur les extrêmes de précipitations au Burundi sur la période de 1981-2100. La plupart de ces événements météorologiques tels que les fortes pluies, les inondations, les sécheresses, la grêle et les ruptures des séries pluviométriques sont plus observables dans notre pays et interviennent dans des zones géographiques bien déterminées. Ces événements extrêmes pèsent de plus en plus lourd dans les budgets des entreprises, des villes, des régions et même des Etats qui doivent décider soit de reconstruire soit d'innover et même de déplacer les habitations détruites ou trop fragilisées. L'activité humaine d'une part et les progrès technologiques d'autre part sont autant de facteurs qui intensifient ces événements. Les destructions matérielles, la perte des vies humaines et les problèmes environnementaux qu'ils provoquent constituent le véritable moteur de la pauvreté dans le monde et, particulièrement, dans les pays en voie de développement comme le Burundi. Devant l'ampleur de ces dégâts, nous sommes actuellement amenés à apporter notre contribution dans la nécessité de limiter l'intensité de ces événements et leurs effets néfastes. De plus, cibler les régions qui seront les plus vulnérables et pointer du doigt aux différentes stratégies d'adaptation et d'atténuation est aussi de grande nécessité. Les résultats de ce travail devraient être la base des futures recherches et aider les décideurs politiques et les autres agents de la société à prendre des solutions en vue d'alerter la population dans la planification des projets surtout à long terme.

# Chapitre 1

# Introduction générale

Dans ce chapitre, nous allons d'abord parler du contexte justifiant le choix de notre sujet de recherche. Ensuite, nous allons donner un aperçu sur les événements météorologiques extrêmes dans le monde et au Burundi avec un accent particulier sur ceux liés aux précipitations. Enfin, nous allons présenter les objectifs visés et montrer la contribution de cette étude lorsque les résultats attendus sont atteints.

## 1.1 Contexte

Partant de l'évolution technologique remarquable depuis le $20^{ème}$ siècle, nombreux scientifiques considèrent que le monde vit une transition vers une nouvelle époque géologique, déterminée de manière significative par les choix et l'action humains notamment les activités industrielles, la combustion de combustibles fossiles, les émissions des gaz à effet de serre et la déforestation [Giraldo, 2021]. Suite à l'augmentation de la température, l'intensité et la fréquence des événements climatiques extrêmes comme la sécheresse, les pluies torrentielles, les inondations, les vagues de chaleur, les hautes températures, les cyclones, les tempêtes, les crues, les déluges [Décamps, 2007] sont susceptibles d'atteindre une ampleur considérable dans l'avenir [GIEC, 2007], [Woodcock, 2002] . Dans son rapport de 2004, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) précise que bien de phénomènes extrêmes sont liés à la variabilité climatique naturelle qui va de pair avec l'activité anthropique [Pachauri et Reisinger, 2008].

Parlant de ces événements, un déficit prolongé de précipitations donne lieu aux sécheresses au moment où leur excès entraîne les inondations perpétuelles, constituant les catastrophes naturelles les plus fréquentes au monde [Jalbert, 2015]. Leur intensification provoque la perte des vies humaines, la destruction des infrastructures et bien d'autres pertes matérielles. Bref, ces événement sont à l'origine de la misère et d'un grand nombre

de dommages dont souffrent plusieurs pays de notre planète, plus particulièrement ceux en voie de développement [Jalbert, 2015]. A titre d'exemple, en 2010, plus de 178 millions de personnes ont été touchées par les inondations et les pertes économiques excèdent 40 milliards de dollars américains [Jha *et al.*, 2012].

Le changement climatique anthropique est susceptible d'augmenter le risque (probabilité d'occurrence d'un danger) d'événements météorologiques extrêmes dans l'avenir [SINDAYIHEBURA et NKUNZIMANA, 2020]. Des études antérieures ont solidement montré comment et où les changements climatiques ont déjà modifié les risques de phénomènes météorologiques extrêmes [Gemenne *et al.*, 2017, Stéphan, 2018].

## 1.2 Justification de l'étude

Les effets des changements climatiques varient d'une région à une autre et peuvent même varier d'une localité à une autre au sein d'un même pays dus aux différents facteurs socio-économiques et environnementaux [GIEC, 2007].

Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier le risque d'événements rares liés aux précipitations extrêmes et estimer leurs périodes de retour dans le cas du Burundi pour des raisons suivantes :

- D'une part, comme l'intensité et la fréquence des événements extrêmement chauds devraient encore augmenter avec le réchauffement climatique [Kharin *et al.*, 2018], la capacité de comprendre les changements potentiels liés à l'occurrence des événements rares des extrêmes de précipitations est essentielle pour orienter les futures stratégies de résilience, d'atténuation et d'adaptation.
- D'autre part, le Burundi est un pays essentiellement agricole et pour lequel les précipitations jouent un grand rôle. Donc, comprendre leur variabilité et savoir détecter les moments d'intenses extrêmes de précipitations est un fait très important pour les communautés burundaises du fait que ces extrêmes peuvent causer des inondations et des sécheresses sans ignorer les différents dégâts matériels et humains.
- De plus, notre étude est menée au moment où nous assistons depuis plusieurs années à des ruptures et des formes diversifiées des séries pluviométriques répétitives dans le pays, un enjeu qui, jusqu'à présent n'a pas encore trouvé de remède. Par conséquent, les résultats de cette étude permettront d'approfondir les connaissances scientifiques quantitatives sur la variabilité et le changement climatique au Burundi. Cela facilitera les études futures sur le sujet et la formulation de mécanismes appropriés pour faire face à la variabilité et au changement des précipitations.

## 1.3 Revue de la littérature

### 1.3.1 Changement climatique et événements extrêmes dans le monde

Le changement climatique est l'une des grandes préoccupations environnementales auxquelles l'humanité est confrontée au XXI$^{ème}$ siècle [Beniston *et al.*, 2007]. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, les températures de surface devraient continuer à augmenter au niveau mondial et des changements majeurs devraient se produire dans les cycles hydrologiques et énergétiques mondiaux [McCarthy, 2001]. Ce changement est à l'origine des événements extrêmes liés aux états métastables transitoires de l'atmosphère, dont les propriétés dynamiques dépendent des propriétés instantanées [Faranda, 2020]. Le changement climatique entraîne des modifications de la fréquence, de l'intensité, de l'étendue spatiale, de la durée et du moment des extrêmes météorologiques, et peut donner lieu à des extrêmes sans précédent [Seneviratne *et al.*, 2012].

L'augmentation des phénomènes extrêmes et l'ampleur des dommages qu'ils occasionnent ne cessent de susciter des interrogations sur leurs natures et leur origines. Quand ils se produisent, ils battent des records. Comme par exemple, le cas des tempêtes Lothar et Martin en 1999, Klaus en 2009 en France avec des vents ayant des vitesses supérieures à 100 km/h [Gardiner *et al.*, 2020], de la canicule européenne de 2003 avec des températures supérieures à $40^oC$ en France et en Grande Bretagne [Schär *et al.*, 2004] et de la sécheresse récurrente dans les zones sahélienne et soudanaise en Afrique de l'ouest [Hountondji, 2008] pour ne citer que cela.

Il est important de noter que les événements extrêmes externes sont tantôt brefs, de l'ordre de quelques heures (tornades, tempêtes), tantôt plus longs, quelques semaines ou quelques mois (inondations, vagues de chaleur, de froid ou de neige) [Decamps, 2010]. Ils varient également d'une région à une autre selon le climat sous des échelles différentes soit :

* **Echelle spatiale** tout d'abord, car un événement extrême à un endroit donné ne l'est plus à un autre endroit, c'est le cas, par exemple, des précipitations dont le débit serait exceptionnel en Europe, mais normal en climat équatorial ;
* **Echelle temporelle** ensuite, car l'échelle de temps d'un événement extrême peut être variable, de quelques heures (orages, phénomènes cévenols...) à plusieurs jours (vague de chaleur, froid intense), voire mois ou années (sécheresse,...) selon le phénomène considéré.

Ces phénomènes météorologiques sont donc localisés à la fois dans l'espace et dans le temps et proviennent essentiellement de la non linéarité et de la complexité du système climatique ainsi que de la variabilité qui en découle sous la somme de deux composantes [Robin *et al.*, 2021] :

* **La variabilité climatique naturelle** qui est la variation du climat au cours d'une même année et d'une année sur l'autre.
* **La variabilité d'origine anthropique** , c'est-à-dire le changement climatique actuellement observé, globalement imputable à l'homme (rejet de gaz à effet de serre, aérosols, utilisation des combustibles fossiles,...) et dorénavant peu controversé.

Les événements extrêmes influent sur le paysage et les conditions de vie. Ils affectent de manière significative l'environnement, la société humaine et les moyens de subsistance [Martin *et al.*, 2018]. Ils peuvent aussi endommager les cultures et les équipements, et perturber la sécurité alimentaire et la nutrition [FAO, 2015].

### 1.3.2 Changement climatique et événements extrêmes au Burundi

Comme d'autres pays d'Afrique Centrale et Orientale, le Burundi n'est pas épargné aux événements extrêmes de précipitations [Nkunzimana *et al.*, 2020b]. Le changement climatique est clairement perceptible dans les relevés climatiques observés au Burundi et a un impact sur les systèmes naturels, les écosystèmes et les secteurs économiques tels que l'agriculture, le tourisme et l'énergie, et il affecte les moyens de subsistance de la population burundaise de diverses manières [MEEATU, 2013].

Les événements extrêmes viennent constituer un autre défi majeur limitant les communautés burundaises à réaliser certains objectifs globaux leur permettant d'atteindre un développement désiré [MATTE, 2007]. Le pays est exposé à divers types d'événements extrêmes. Tout au long de son histoire, le pays fut menacé par une série d'épisodes catastrophiques. A titre d'exemple, nous citons :

– Des pluies torrentielles et surtout des inondations à Bubanza et dans la ville de Bujumbura, la montée de 4 m du niveau du lac Tanganyika entre 1961 et 1964 qui a provoqué d'importants dégâts.

– Dans le nord du pays, fin 2005 et début 2006, la sécheresse a été déclarée catastrophe nationale et a coûtée une somme colossale de 71 milliards de francs burundais (environ 45,8 millions USD) en guise de solidarité nationale [MEAE, 2019].

Au cours de cette dernière décennie, la vulnérabilité devient de plus en plus grandissante suite aux extrêmes de précipitations [**?**, Nkunzimana *et al.*, 2021] :

– En Février 2014, les grandes inondations intervenues dans certaines parties de la capitale Bujumbura après les pluies torrentielles ont eu pour tragiques conséquences, le décès de près de 60 personnes et de plus de 80 blessés. Ces inondations ont également détruit des centaines de maisons, et des milliers de personnes se sont retrouvés sans abri. Cet événement s'est répété récemment dans le quartier Kiyange 1 en 2018 suite au débordement de la Rivière Mutimbuzi et a causé d'énormes pertes matérielles et en vies humaines.

– Depuis septembre 2015, plus de 4 millions de personnes ont été affectées par des pluies diluviennes ou torrentielles, des déficits hydriques, des vents violents, des inondations et des glissements de terrain. Par suite, 30.000 hectares de cultures et 5000 habitations ont été détruits sans oublier que plus de 300 salles de classe et une cinquantaine de ponts ont aussi été endommagés. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [Nkunzimana *et al.*, 2020b], plus de 42000 personnes ont été déplacées fuyant les catastrophes naturelles et seraient toujours dans le besoin humanitaire dans les provinces de Kirundo, Makamba, Bubanza, Cibitoke et Ruyigi.

Autant de conséquences dues à ces perturbations climatiques sont très remarquables et les pertes économiques qui sont encourues sont vraiment terribles. La figure 1.1 montre un cas d'inondations en Mairie de Bujumbura et ses environs la nuit du 9 au 10 Février 2014 [PNPRGC, 2014]. Le tableau 1.1 illustre l'inventaire des dépenses qui ont été enregistrées pour la réhabilitation des dommages causés aux infrastructures économiques et sociales par ces inondations de la nuit du 9 au 10 Février 2014 en Mairie de Bujumbura. Tous ces dommages ont coûté au total une somme équivalente à peu près 6,9 milliards de FBU, une somme pas si moindre à voir la conjoncture économique du pays.

Table 1.1 – Dépenses allouées aux dommages d'infrastructures suite aux inondations du 9 au 10 Février 2014 en Maire de Bujumbura [PNPRGC, 2014]

| Types d'infrastrucutres | Dépenses (Millions de FBU) |
|---|---|
| Routes | 3500 |
| Ecoles | 775 |
| Ponts | 675 |
| Infrastructures agricoles | 650 |
| Marchés | 640 |
| Système d'adduction en eau potable | 627 |
| Réseau électrique | 80 |

Face à ces effets, un réel besoin d'anticipation existe déjà. Comme tant d'autres institutions de recherche en Afrique, le Burundi n'est pas efficacement équipé en matière de surveillance climatique et météorologique [Behrangi *et al.*, 2011]. Ainsi donc, notre étude sur les risques d'événements extrêmes dus aux précipitations au Burundi, avec la



FIGURE 1.1 – Inondations en Mairie de Bujumbura le 9 Février 2014
Source : https://www.cnews.fr/monde/2014-02-10/burundi-des-intemperies-font-plus-de-50-morts-dans-la-capitale-656483

détermination des niveaux et des durées de retour, pourra contribuer à répondre à ces préoccupations.

## 1.4 Questions de recherche sur le Burundi

Dus au changement climatique que connaît notre planète aujourd'hui, les événements extrêmes sont une réalité au monde et se manifestent sous des formes spectaculaires et diversifiées au Burundi [SINDAYIHEBURA et NKUNZIMANA, 2020]. Ces événements ont des impacts dévastateurs et freinent le développement des sociétés.

De même, les effets du changement climatique constituent un problème majeur pour l'économie burundaise dans la mesure où ils compromettent gravement les efforts de développement humain dans tous les secteurs clés de la vie nationale [SABUSHIMIKE, 2017].

Bien que les projections à long terme soient très instructives à des fins de planification, il est nécessaire de comprendre les tendances passées et actuelles des conditions météorologiques dans une zone limitée comme le Burundi à l'aide des modèles climatiques plus améliorés c'est-à-dire des Modèles de circulation générale (MCG) les plus récents afin

de prendre des décisions éclairées dans le cadre de divers processus de planification. Pour cette raison, notre étude pourra occuper une place de choix et permettra de répondre à certaines questions : Comment déterminer la variabilité et la distribution des extrêmes annuels de précipitations dans le climat actuel ? Comment les changements climatiques futurs vont affecter la probabilité des extrêmes de précipitations ? Quelles sont les régions du Burundi qui seront les plus touchées ?

## 1.5 Objectif de l'étude

### 1.5.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce travail est de détecter les changements de la probabilité d'occurrence des extrêmes de précipitations dans le climat futur dans les différentes régions du Burundi sur la période 2021-2100.

Cette période de projection est subdivisée en deux sous-périodes (2021-2060 et 2061-2100). Nous avons choisi les deux sous-périodes pour pouvoir fournir des informations claires sur le changement des précipitations dans un avenir proche et plus lointain afin d'étayer les processus décisionnels sur les différents horizons de planification.

### 1.5.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif principal, les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- Tout d'abord, nous allons calculer les paramètres d'ajustement de la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) pour les indices de précipitations extrêmes (**Rx1day**, **Rx3day**, **Rx5day**) dans le climat actuel du Burundi ;
- Ensuite, nous allons déterminer les changements des paramètres d'ajustement de GEV pour les indices de précipitations extrêmes dans le climat futur du Burundi ;
- Et enfin, nous allons prédire les changements de la probabilité de l'occurence des événements climatiques extrêmes rares et localiser les régions du Burundi qui seront les plus touchées.

## 1.6 Hypothèse de recherche

En abordant la manière dont un réchauffement climatique supplémentaire affecterait les risques futurs de précipitations extrêmes au Burundi, l'hypothèse de cette étude est

formulée comme suit : “les modifications climatiques actuelles augmentent la probabilité de l’occurence des extrêmes de précipitations.”

## 1.7 Contribution de l’étude

Le Rapport du GIEC [GIEC, 2012] a souligné la nécessité d’études plus détaillées sur les changements climatiques aux échelles régionale et locale, ce qui présente un intérêt particulier pour le dévéloppement des nations et aux groupes économiques car l’ensemble de données historiques homogènes sont souvent denses et disponibles à ces échelles.

Pour répondre à cet appel, la présente étude explore les changements des précipitations maximales annuelles au Burundi, en les caractérisant à l’aide de la fonction de distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) [Coles *et al.*, 2001]. La théorie des GEV utilisée dans ce travail est un cadre théorique solide pour détecter les changements de la probabilité des événements extrêmes rares tels que les maxima élevés [Zwiers et Kharin, 1998], [Wehner, 2005]. Elle vise à fournir des statistiques robustes pour les maxima de bloc qui permettent de calculer les valeurs de retour des événements extrêmes rares [Raggad, 2009]. Signalons qu’à notre connaissance, cette théorie des valeurs extrêmes n’a pas encore été appliquée au Burundi pour détecter les risques de l’occurrence des événements extrêmes rares de précipitations sur la période 2021-2100.

De plus, cette étude utilise les modèles les plus récents de la phase six du projet d’Intercomparaison des Modèles Couplés (CMIP6) avec une haute résolution spatiale suite à une technique robuste de la descente d’échelle appliquée. Elle examine si les changements futurs du climat modifieront systématiquement le mode, la variabilité et/ou la forme de la queue de la distribution des précipitations extrêmes journalières.

## 1.8 Limite de l’étude

L’étude détecte les changements de la probabilité des extrêmes de précipitations dans le climat futur du Burundi. Elle se focalise sur les maximas des précipitations susceptibles de causer des événements extrêmes rares comme les inondations. Elle utilise des modèles climatiques fiables validés par le GIEC et recommandés par l’Organisation Mondiale de la Météorologie pour les études du climat. Par conséquent, l’étude ne cherche pas à construire de nouveaux modèles climatiques qui feraient l’objet d’une validation par le GIEC pour être qualifiés fiables.

De plus, l'étude ne traite pas les risques d'événements extrêmes rares liés aux minimas des précipitations comme les séchéresses. Enfin, notre travail se limite à un scénario pessimiste pour les projections futures afin d'alerter les décideurs sur les futurs dangers climatiques si rien n'est fait.

## 1.9 Résultats attendus et bénéficiaires

Les principaux résultats attendus de ce travail sont :

- Les paramètres d'ajustement de la distribution GEV pour les indices clés de précipitations extrêmes du climat actuel sont déterminés ;
- Les changements des paramètres d'ajustement de GEV pour les indices clés de précipitations extrêmes du climat futur sont détectés ;
- Les changements de la probabilité de l'occurence des événements climatiques extrêmes rares sont prédits et les régions du Burundi qui seront les plus touchées sont localisées.

Si les résultats ci-dessus sont atteints, les bénéficiaires seront dans un premier temps les décideurs politiques décidant des orientations futures sur l'agriculture et les infrastructures ainsi que toutes les institutions, agences et individus intervenant dans le secteur de transport. De plus, les banques pourront évaluer les risques avant de contracter des crédits de financements surtout à long terme dans le domaine de l'agriculture et des infrastructures. Enfin, la communauté scientifique pourra se servir de ces résultats comme un outil de référence pour ses études.

## 1.10 Articulation de l'étude

A part l'introduction générale prise comme chapitre premier, nous subdivisons la suite de notre travail en quatre chapitres. Le deuxième chapitre sera consacré à la description du lieu et du paramètre atmosphérique d'étude. Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des données, du matériel et de la méthodologie utilisée. L'avant dernier chapitre sera consacré à l'interprétation et à la discussion des résultats. Enfin, une conclusion générale et des perspectives visant à renforcer la capacité des autorités locales pour la mise en œuvre des recommandations seront présentées au dernier chapitre.

# Chapitre 2

# Description du lieu et du paramètre atmosphérique d'étude

Ce chapitre nous présente le Burundi comme notre lieu d'étude et explique en bref le paramètre atmosphérique d'étude. Signalons que la description du lieu d'étude se focalise essentiellement sur ses caractéristiques générales et les activités socio-économiques.

## 2.1 Description du lieu d'étude

### 2.1.1 Localisation géographique

La figure 2.1 délimite le Burundi qui est notre lieu d'étude. Situé en Afique de l'Est, le Burundi est un pays au "cœur de l'Afrique" au Sud de l'Equateur. Il est entre les méridiens 28°58′ et 30°53′ de longitude Est et entre les parallèles 2°15′ et 4°30′ de latitude Sud (`https://www.mae.gov.bi/geographie/`), [MATTE, 2007].

Beaucoup de chercheurs qui ont travaillé sur la région des Grands-Lacs d'Afrique ont, à maintes reprises, déclaré le Burundi comme un pays particulièrement montagneux avec un extraordinaire moutonnement de collines (ce qui d'ailleurs a valu à ce pays le surnom de « pays aux mille et une collines »). C'est un pays densément peuplé, situé au cœur de l'Afrique loin des côtes africaines et loin des routes donnant accès à la mer [Ndayisenga, 2010]. Sa superficie est de 27834 $km^2$ dont 25200 terrestres. Il est enclavé et se trouve à 1200 $km$ de l'Océan Indien, à 2000 $km$ de l'Océan Atlantique et à 2300 km de la Mer Rouge. Gitega et Bujumbura sont respectivement ses capitales politique et économique. Ses pays limitrophes sont le Rwanda au Nord, la Tanzanie à l'Est et au Sud, et la République Démocratique du Congo à l'Ouest dont il est séparé par la rivière Rusizi, déversoir du lac Kivu, et par le lac Tanganyika [Lewalle, 1972].

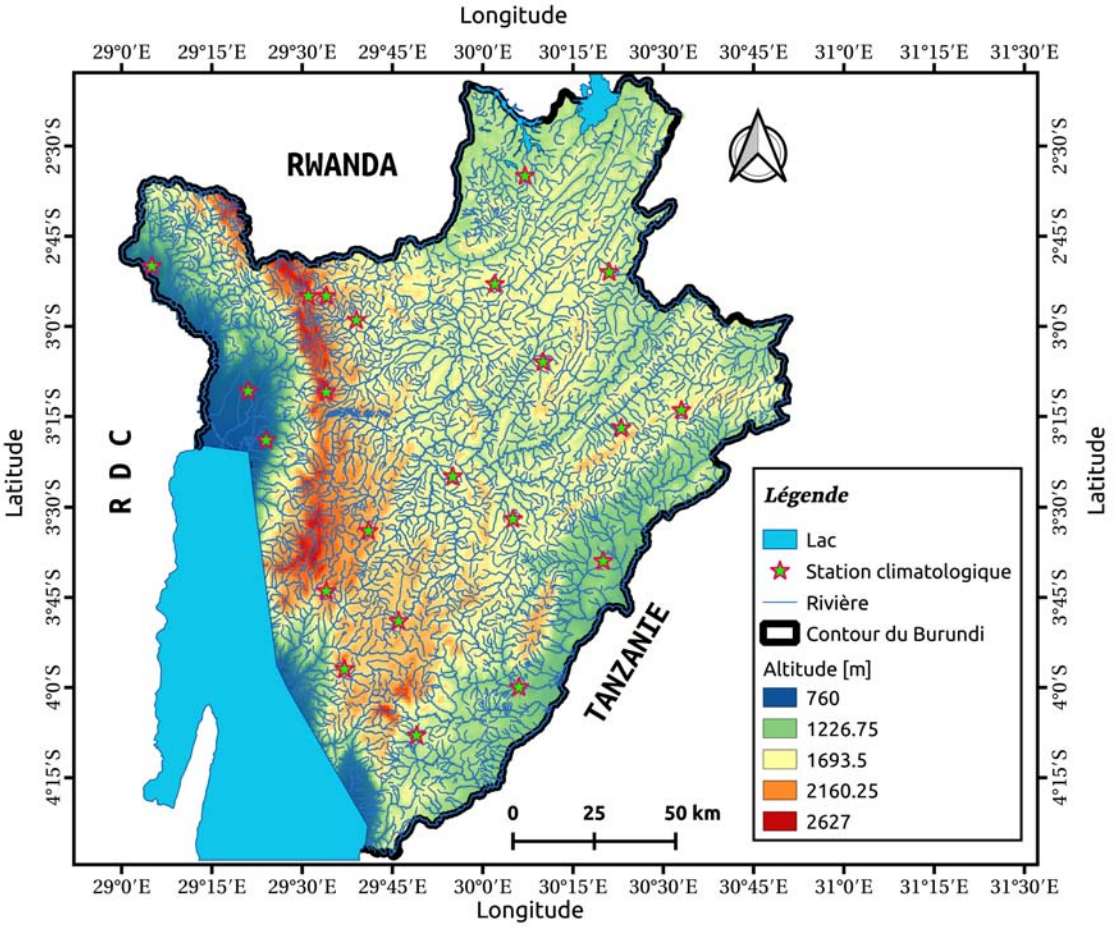



FIGURE 2.1 – Localisation du lieu d'étude

### 2.1.2 Le relief

Le Burundi se distingue par sa diversité du relief et de ses paysages. Le relief du pays est caractérisé par la région du grand rift de l'Afrique orientale qui a donné lieu à la formation du lac Tanganyika dans un fossé d'effondrement à l'Ouest et à un ensemble de plateaux au relief fortement découpé à l'Est [Nzigidahera, 2012].

Ainsi, selon [Nkurunziza, 1996, MATTE, 2007], 5 zones géomorphologiques assez diversifiées forment le relief du Burundi à savoir :

- La plaine basse occidentale de l'Imbo située entre 774 m et 1000 m d'altitude localisée au bord du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi ;
- Les plateaux centraux constitués par des collines aux sommets aplanis, individualisées ou plus souvent rattachées les unes aux autres par des ensellements. Ils couvrent ainsi la majeure partie du pays avec une altitude variant entre 1350 m et 2200 m. Ils regroupent les régions naturelles de Kirimiro, une grande partie de Buyogoma, Bututsi, Bweru et Buyenzi.
- La dépression orientale de Kumoso située entre 1200 m et 1400 m d'altitude, la dépression du Bugesera localisée au Nord-Est du Burundi et située entre 1200 m

et 1500 m d'altitude ainsi que celle de Buragane au Sud du pays avec une altitude comprise entre 1000 m et 1200 m d'altitude.

– Notons enfin les escarpements de faille des Mumirwa et de Mugamba formant la crête Congo Nil située entre 1000 m et 2000 m d'altitude. C'est sur la crête Congo Nil qu'on trouve les plus hauts sommets du pays comme Heha (2670 m), Teza (2655 m) et Twinyoni (2652 m).

Ces prédispositions morpho-structurales expliquent déjà la fragilité de l'ensemble de l'écosystème face à des événements météorologiques extrêmes liés au changement climatique en cours. De plus, le Burundi présente un relief très accidenté et des sols de faible à moyenne fertilité [Pozy, 1989].

### 2.1.3 L'hydrologie

Le Burundi se distingue par une richesse de ressources en eau abondantes. Il est partagé entre deux grands bassins hydrographiques tels que :

– Le bassin du Nil, constitué d'une part par la Ruvubu et ses affluents, d'autre part par la Kanyaru, affluent de la Kagera, couvrant ainsi une superficie de 3800 $km^2$ ;

– Le bassin du Congo qui, avec une superficie de 14034 $km^2$, comprend le sous-bassin situé à l'Ouest de la crête Congo Nil alimenté par la Rusizi et ses affluents ainsi que le lac Tanganyika et le sous-bassin de Kumoso situé à l'Est du pays où coulent Malagarazi et ses affluents se jetant finalement dans le lac Tanganyika en Tanzanie.

Le Burundi possède un réseau dense de cours d'eau permanents et de nombreux axes de drainage et il est très riche en lacs naturels à savoir les lacs Tanganyika, Cohoha, Rweru, Rwihinda, Gacamirindi, Kanzigiri, Gitamo, Rwungere, Narungazi, Inampete, Dogodogo, et en lacs de retenue (Kavuruga et Rwegura).

Malgré cette richesse en ressources hydriques, l'eau au Burundi est une ressource mal gérée et vulnérable [Michel SCHLAIFER, 2007], limitée par une variété de facteurs comprenant notamment les conditions climatiques souvent défavorables dans certaines régions ainsi que l'inégale distribution spatio-temporelle des pluies.

### 2.1.4 Le climat

Le Burundi compte plus de 70 stations météorologiques dont certaines sont en fonctionnement il y a des dizaines d'années [Lewalle, 1972]. La température, les précipitations et le rythme saisonnier sont autant de facteurs importants dont la détermination

climatique [DE SAEGER, 1954] se dote d'une diversité climatologique en raison de son climat variant en fonction de l'altitude.

Son altitude variant entre 773 m et 2670 m lui confère un climat de type tropical tempéré et on assiste à une alternance de deux saisons à savoir : la saison sèche qui va de Juin à Septembre (durée de trois mois) et la saison des pluies qui va d'Octobre à Mai (durée de neuf mois) qui constituent un des critères importants dans la différenciation régionale des climats :

- Le climat de montagne à tendance équatoriale (spécialement sur la crête) et sa retombée occidentale ;
- Le climat tropical à courte saison sèche (partie Est de la crête et les plateaux centraux) ;
- Le climat tropical à longue saison sèche (l'Ouest, le nord et l'Est du pays).

La climatologie du Burundi est caractérisée par un régime pluviométrique bimodal qui correspond au mouvement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) se déplaçant du Sud vers l'hémisphère Nord et vice versa.

Les précipitations augmentent généralement avec l'altitude avec des minima de l'ordre de 500 mm enregistrés dans la plaine de la Rusizi au moment où les maxima atteignent 2200 mm dans les régions de hautes altitudes. La moyenne pluviométrique du pays est de 1274 mm et on observe une pluviométrie abondante au cours du mois d'Avril [SABUSHIMIKE, 2017]. Au contraire, au fur et à mesure qu'on monte en altitude, on observe une dimunition de la température avec une moyenne plus basse de $15,6°C$ à Rwegura alors que la plus élevée est enregistrée dans la plaine de l'Imbo et vaut $24,1°C$ [Kabanyegeye *et al.*, 2020].

### 2.1.5 La population et ses principales activités

#### 2.1.5.1 La population

Le Burundi ne fait pas exception à la réalité démographique observée en Afrique subsaharienne, la région de l'Afrique dont la croissance démographique est de loin la plus rapide au monde. En 2008, le recensement général de la population et de l'habitat mené par l'institut de statistiques et d'études économiques du Burundi (ISTEEBU) a révélé que ce pays d'Afrique de l'Est comptait plus de huit millions d'habitants avec un taux d'accroissement annuel de la population de $2,4\%$.

Selon les prévisions démographiques de l'ISTEEBU réalisées en 2017, la population était de 11.495.438 habitants avec $49,3\%$ d'hommes et $50,7\%$ de femmes. L'enquête de santé du Burundi effectuée la même année montre quant à elle que la population burundaise est à majorité jeune avec 65% de personnes de moins de 25 ans et $51,5\%$ de moins de 18 ans au moment où les personnes âgées de 60 ans et plus ne représentaient que $5,4\%$ de la population globale [ISTEEBU, 2017].

En 2020, les projections démographiques de l'ISTEEBU présentent le Burundi avec une population de 12.309.600 habitants, un indice de fécondité de 5,5 enfants par femme et une densité démographique moyenne de 442 habitants au $km^2$. A l'heure actuelle la même population est estimée à plus de 12.890.000 habitants avec un indice de fécondité de 6,1, une densité de 463,2 habitants au $km^2$ avec un taux d'accroissement annuel de $3,18\%$. Il est évident que, si aucune mesure de redressement de la situation n'est prise, cette densité continuera d'augmenter et pourrait doubler en 2050 [ISTEEBU, 2019].

Cette explosion démographique que connaît la plupart des pays pauvres engendre des conséquences énormes sur le plan de développement socio-économique et environnemental [ONU, 2019]. En réalité, le Burundi souffre de ces effets dominés surtout par une forte pression sur les ressources limitées du pays notamment une pression excessive sur les terres agricoles et les ressources naturelles ainsi qu'une réduction des espaces naturels conduisant ainsi à la dégradation des sols et de l'environnement [SABUSHIMIKE, 2017].

#### 2.1.5.2 Les activités socio-économiques

Le Burundi vit essentiellement de l'agriculture et de l'élevage et en moindre partie de la pêche constituant presque le poumon de l'économie nationale [Pozy, 1989]. Quant à l'industrie, l'artisanat ainsi que les diverses activités du tertiaire, ces activités occupent une place très négligeable [Ndayisenga, 2010].

L'agriculture burundaise demeure celle de subsistance avec une faible productivité et est orientée vers l'autoconsommation [MEEATU, 2014a]. Elle est caractérisée par des cultures pluviales, de faibles revenus agricoles et des moyens de production (intrants, mécanisation) très limités par la faible accessibilité du marché des produits, intrants agricoles et instruments financiers pour les paysans. Elle se heurte à de nombreux facteurs comme la durée de pluie très courte (3-4 mois par an), des exploitations agricoles trop petites, des méthodes et techniques agricoles inadaptées, des problèmes liés au climat d'une part la carence de précipitations, d'autre part les pluies torrentielles endommageant les cultures. Ces caractéristiques rendent ainsi l'agriculture du Burundi très vulnérable aux aléas climatiques. Des cultures vivrières (haricot, manioc, patates douces, la banane) [Lewalle, 1972]

ne procurent que de faible rendement. A ces dernières s'ajoutent d'autres comme les céréales tel que le riz, le blé et le maïs [Gahiro, 2011] ainsi que les légumes et les fruits. Mais, tout cela n'emperche pas la tendance à la détérioration de la qualité de la ration alimentaire [Michel SCHLAIFER, 2007].

Les principales cultures commerciales comportent surtout le café [Nibasumba *et al.*, 2013] et le thé tandis que le coton est en régression constante aujourd'hui. La production de l'huile de palme et de la canne à sucre est aussi d'une grande importance.

L'activité agricole est associée aux pratiques d'élevage qui comprend le gros et le petit bétail ainsi que des volailles. Des animaux domestiques dits caprins, volailles, bovins, ovins, lapins et porcins, complètent l'alimentation des ménages et procurent en plus du fumier, jouant par conséquent un grand rôle dans l'économie du pays [MEAE, 2017].

Notons en passant l'existence d'autres activités comme la pêche, l'apiculture ainsi que l'exploitation minière qui restent à dévélopper pour les rendre plus rentable.

## 2.2 Description du paramètre atmosphérique d'étude

Dans ce travail, les précipitations formées de l'eau atmosphérique qui tombe sur la surface de la terre sous forme liquide (eau de pluie) constituent le paramétre clé de cette étude. Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression et reflètent les conditions et les processus spécifiques qui se dévéloppent en altitude [Jalbert, 2015].

### 2.2.1 Eau de pluie

Les précipitations proviennent des micro-gouttelettes d'eau qui constituent les nuages et qui par divers mécanismes de transfert de masse, ont atteint une taille suffisamment grande pour posséder leur propre vitesse de chute. Un nuage reste stable tant que ces gouttelettes, dont la concentration est de quelques dizaines par centimètre cube, restent en équilibre avec la vapeur d'eau environnante.

La tension en eau de pluie à partir de son contenu spécifique est définie par [Pascal, 2004] :

$$W_r = \rho_{airsec}.q_r \tag{2.1}$$

avec $W_r$ en $g/m^3$, $\rho$ en $kg/m^3$, $q_r$ en $g_{eau}/kg_{airsec}$.

Le calcul de la vitesse de chute des gouttes de pluie est utile aussi bien pour la simulation numérique de la physique de l'atmosphère que pour les applications expérimentales. La vitesse verticale des gouttes de pluie dans l'atmosphère est fonction de leurs traînées et de leurs poids. Sa vitesse terminale est obtenue lorsque ces 2 forces s'égalisent. Un des premiers à avoir donné une formulation pour la vitesse de chute à partir de mesures expérimentales est [Spilhaus, 1948] :

$$\frac{V^2}{r} = \frac{A}{\rho} \tag{2.2}$$

où $V$ est la vitesse de chute, $r$ le rayon de la goutte sphérique dont la masse est égale à celle de la goutte considérée, $\rho$ la densité de l'air ambiant, et $A$ un coefficient qui dépend de la traînée de la goutte et de sa géométrie.

Une relation analytique entre vitesse et diamètre de goutte basée sur les travaux de [Gunn et Kinzer, 1949] est :

$$V(r) = 9,65 - 10,3exp(-1,2r) \tag{2.3}$$

où $V$ est la vitesse de chute en $m/s$, et $r$ le rayon de la goutte en $mm$.

Selon les travaux de [Kessler, 1969], l'équation (2.2) devient, pour des diamètres supérieurs à 500 $\mu m$ :

$$V(r) = -0,183848\left(\frac{\rho_0}{\rho}r\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.4}$$

où $\rho_0$ est la densité de l'air au niveau de la mer, et $r$ le rayon exprimé ici en $\mu m$ et $V$ en $m/s$. Le signe négatif est utilisé pour respecter la convention qui consiste à considérer comme positives des vitesses ascendantes.

On peut encore citer les études de [Atlas et Ulbrich, 1977] qui, à partir de mesures radars, ont proposé comme vitesse terminale de chute la loi suivante :

$$V(r) = 6,011r^{0,67} \tag{2.5}$$

où $V$ est exprimé en $m/s$ et $r$ en $mm$.

### 2.2.2 Microphysique de la pluie

Une difficulté apparaît pour la description du spectre de la pluie puisque les gouttes de pluie sont suffisamment grandes pour avoir, selon leur diamètre, des formes différentes

et ne peuvent pas être caractérisées par une seule dimension.

En effet, des mesures et calculs numériques ont montré qu'au delà de $300\mu m$, la distribution de pression autour de la goutte engendrée par la résistance de l'air durant la chute déforme la sphère pour lui donner une forme plutôt aplatie. La convention consiste à adopter la notion de diamètre équivalent $D_0$ qui se définit comme le diamètre de la sphère qui contiendrait le même volume d'eau que la goutte déformée. On définit aussi le diamètre médian $D_{50}$ pour lequel le volume des gouttes de taille inférieure égale le volume des gouttes de taille supérieure [Pascal, 2004].

En plus des diamètres médian $D_{50}$ et équivalent $D_0$, il y a 3 autres quantités qui sont généralement utilisées pour caractériser la pluie :

- la distribution de la taille de gouttes $n(D_0)$ exprimée en terme de nombre de gouttes par mètre cube d'air et par millimètre d'intervalle de taille.
- le contenu en eau $W_r$ en $g/m^3$.
- l'intensité de pluie théorique de la distribution $R$ exprimée généralement en $mm/h$.

Ces variables sont définies comme suit [Pascal, 2004] :

$$W_r = \frac{\pi}{6} 10^{-3} \rho_w \int_0^\infty D_0^3 n(D_0) dD_0, \tag{2.6}$$

où $D_0$ est en $m/s$ et $\rho_w$ en $g/cm^3$,
et

$$R = 6\pi 10^{-4} \int_0^\infty D_0^3 n(D_0) V_c(D_0) dD_0 \tag{2.7}$$

où $V_c$ est la vitesse terminale de chute en mètres par secondes d'une goutte de diamètre équivalent $D_0$.

## 2.3 Conclusion

Pour conclure, nous avons fourni dans les sections précédentes de ce chapitre une brève description de notre lieu détude. Nous avons également présenté notre paramètre atmosphérique « pluie » qui constitue le paramètre clé de notre étude.

# Chapitre 3

# Données, matériels et méthodologie utilisés

Ce chapitre parle en détails des données dont nous nous sommes servis. Il présente aussi les logiciels utilisés ainsi que la méthodologie mise en œuvre pour aboutir aux résultats de la recherche. Pour les nombres décimaux, le point est défini comme le séparateur décimal dans toute la suite du travail.

## 3.1 Les données utilisées et leur source

Les données utilisées comprennent les précipitations enregistrées par des stations météorologiques au sol (In-situ) et par des satellites ainsi que les simulations des précipitations sorties des modèles climatiques.

### 3.1.1 Les données météorologiques observées

Les données observées par des stations au sol (In-situ) ont été fournies par l'Institut Géographique du Burundi (IGEBU). Les coordonnées géographiques des 22 stations climatologiques utilisées sont présentées dans le tableau 3.1. Ce travail a utilisé des précipitations journalières (cumuls journaliers), exprimées en millimètres (mm), sur une durée de 40 ans allant de 1981 jusqu'en 2020. Cette période choisie respecte les exigences de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) qui recommande une période d'au moins 30 ans pour une étude du climat [OMM, 2017].

Ces données ont d'abord été vérifiées avant d'être utilisées. Les données manquantes ont été remplies à l'aide de la méthode de la moyenne des plus proches voisins mois par mois.

Table 3.1 – Liste des stations climatologiques utilisées

| Nom de la station | Longitude | Latitude |
|---|---|---|
| Bujumbura : Aéroport | 29.4 | -3.316666667 |
| Bururi-Vyanda | 29.61666667 | -3.95 |
| Cankuzo : projet | 30.38333333 | -3.28333333 |
| Gatara | 29.65 | -2.98333333 |
| Gitega :aérodrome | 29.91666667 | -3.416666667 |
| Gisozi | 29.68333333 | -3.56666667 |
| Imbo : sems | 29.35 | -3.18 |
| Karusi | 30.16666667 | -3.1 |
| Kinyinya | 30.3333333 | -3.65 |
| Kirundo | 30.11666667 | -2.58333333 |
| Makamba | 29.81666667 | -4.133333333 |
| Mparambo | 29.08333333 | -2.83333333 |
| Mpota :Tora | 29.5666667 | -3.73333333 |
| Munanira | 29.0833333 | -2.83333333 |
| Muriza | 30.08333333 | -3.53333333 |
| Musasa | 30.1 | -4 |
| Muyaga | 30.55 | -3.23333333 |
| Muyinga | 30.35 | -2.85 |
| Nyamuswaga | 30.03333333 | -2.88333333 |
| Nyanza Lac | 29.6 | -4.35 |
| Rwegura | 29.51666667 | -2.916666667 |
| Ruvyironza | 29.76666667 | -3.81666667 |

### 3.1.2 Les données pluviométriques CHIRPS

Les stations au sol sont inégalement réparties dans la plupart des pays d'Afrique, tant dans le temps que dans l'espace [Sylla *et al.*, 2013]. Ainsi, pour surmonter cet obstacle de la rareté des stations, nous avons utilisé une estimation des précipitations par celles du Groupe "Climate Hazards Infrared Precipitation with Station observation" (CHIRPS version 2.0). Les données CHIRPS sont des données satellitaires corrigées par celles des stations au sol. Les données CHIRPS sont disponibles de 1981 à nos jours avec une résolution spatiale de $0.05° \times 0.05°$ ($\sim 4.8km$). Elles sont accessibles gratuitement sur `https://app.climateengine.com`. Les informations détaillées sur le produit CHIRPS sont données par [Ayehu *et al.*, 2018].

Les études faites dans les différentes régions sur l'ensemble des données CHIRPS ont conclu que ces données sont susceptibles de fournir des informations fiables et précises sur les précipitations par rapport aux autres ensembles de données satellitaires existantes [Asadullah *et al.*, 2008], [Babaousmail *et al.*, 2019], [Ayugi *et al.*, 2019].

Au Burundi, les données CHIRPS ont déjà été utilisées dans des différentes études.

On peut citer, par exemple, une étude sur l'analyse des événements de sécheresse, de leur tendance et des facteurs de télé-connexion sur le Burundi [Nkunzimana *et al.*, 2021].

### 3.1.3 Performance des données CHIRPS sur le Burundi

Une étude a été réalisée sur le Burundi pour évaluer la performance des données CHIRPS par rapport aux autres données satellitaires [Nkunzimana *et al.*, 2020b]. Ainsi, les données satellitaires et de réanalyse suivantes ont été comparées aux données CHIRPS :

- PERSIANN-CDR "Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Net-works- Climate Data Record" : Ce produit est développé avec un algorithme PERSIANN qui est à son tour récupéré par des satellites géostationnaires afin de fournir des informations précises sur la région capturée. Les informations détaillées sur les données PERSIANN-CDR peuvent être trouvées dans les travaux de plusieurs chercheurs [Ashouri *et al.*, 2015], [Hsu *et al.*, 1997].
- CRU "Climate Research Unit" : Les séries temporelles CRU Version 4.01 sont dérivées des observations des jauges et sont disponibles de 1901 à aujourd'hui. Les séries chronologiques du CRU sont des données d'analyse basées sur les enregistrements de plusieurs stations météorologiques dans le monde. Les détails sur les données CRU peuvent être consultés dans les travaux de Harris et ses colloborateurs [Harris *et al.*, 2014].

#### 3.1.3.1 Evaluation de la performance sur base des précipitations mensuelles

La figure 3.1 montre la comparaison de la performance des produits basés sur les données satellitaires à représenter les précipitations saisonnières dans six régions du Burundi sur une période de 34 ans (de 1983 à 2016) [Nkunzimana *et al.*, 2020a].

Ces résultats ont montré que seul le produit CHIRPS est susceptible de représenter la quantité de précipitations mensuelles dans toutes les régions par rapport aux autres produits. Cependant, il présente une forte surestimation des précipitations de mars-avril et de novembre-décembre dans les régions montagneuses mais également une légère surestimation de la quantité de pluie à l'Est et au Sud.

Les données CRU sont susceptibles de représenter la quantité de précipitations sur les régions du nord et du centre bien qu'ils sous-estiment la quantité de précipitations pour les mois de mars-avril dans le Nord et sous-estiment fortement la quantité de précipitations de Janvier-Février au Centre. Les produits CRU sont aussi moins performants dans les régions montagneuses, à l'Ouest, à l'Est et au Sud.

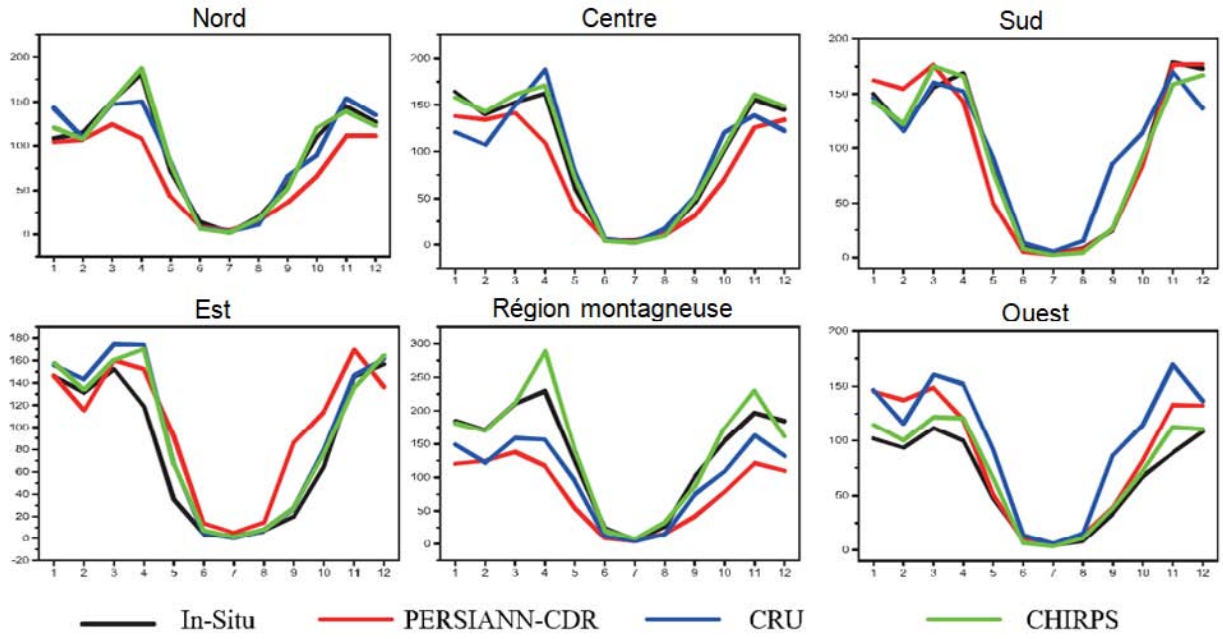



FIGURE 3.1 – Les précipitations mensuelles pour les six régions calculées en moyenne sur une période de 34 ans, (de 1983 à 2016)

Le produit PERSANN-CDR présente des performances médiocres. Si l'on considère toutes les régions, il est peu probable que PERSIANN-CDR puisse représenter de façon exacte la quantité de précipitations sur le Burundi, sauf dans la région Sud où il semble correspondre aux mesures observées au sol pendant la courte saison de pluie.

#### 3.1.3.2 Evaluation de la performance sur base des paramètres statistiques

L'évaluation de la performance a été focalisée sur les paramètres statistiques tels que la moyenne, l'écart-type (Std), le biais, l'erreur quadratique moyenne (EQM), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de corrélation (CC). Ces mesures statistiques sont largement utilisées pour évaluer la performance des produits pluviométriques basés sur les satellites en utilisant l'observation au sol comme données de référence et se sont avérées fournir une évaluation cohérente et fiable des produits [Ayugi *et al.*, 2019], [Deng *et al.*, 2019], [Dinku *et al.*, 2018], [Ullah *et al.*, 2019].

Pour nous rendre compte de la fiabilité des informations pluviométriques fournies par les produits d'observation au sol et les produits satellitaires, le coefficient de corrélation (CC) nous permet d'évaluer la concordance entre le produit quadrillé individuel (S) et les données de la station (G) sur différentes zones climatiques et topographiques (équation (3.1)). Le CC permet de quantifier l'ampleur de la relation linéaire entre la station et les produits basés sur le satellite raison pour laquelle un CC proche ou égal à 1 implique une forte corrélation entre les données satellitaires et les données de la station.

Le biais est utilisé pour montrer la direction moyenne de l'écart centré des données satellitaires par rapport aux observations in situ. Le biais négatif exprime la zone où les précipitations basées sur le satellite sont plus élevées que les données d'observation au sol tandis que le biais positif représente la région où les estimations des précipitations basées sur le satellite sont plus faibles que les données d'observation au sol.

La EQM permet d'estimer l'ampleur moyenne des différences entre les produits de précipitations basées sur le satellite et des précipitations in situ, tandis que le STD (équation (3.5)) est utilisé pour évaluer la variation relative et les différences d'amplitude entre les précipitations basées sur le satellite et les précipitations observées in situ.

Ces mesures statistiques ont été déterminées comme suit [Dinku *et al.*, 2018] , [Ullah *et al.*, 2019] :

$$\text{Le coefficient de corrélation :} \quad CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{s})^2}} \tag{3.1}$$

Afin d'évaluer l'Erreur Absolue Moyenne (MAE) et l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM), les équations respectives (3.2) et (3.3) ont été appliquées.

$$\text{L'erreur absolue moyenne :} \quad MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|G_i - S_i| \tag{3.2}$$

$$\text{L'erreur quadratique moyenne :} \quad EQM = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(G_i - S_i)^2} \tag{3.3}$$

Le biais est obtenu en prenant la différence entre la moyenne des données du produit par satellite et la moyenne des données observées au sol (équation (3.4)). Un biais positif signifie que le produit satellitaire surestime les précipitations au moment où celui négatif montre que les données satellitaires sous-estiment la quantité de précipitations.

$$\text{Le biais :} \quad BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{n} G_i} \tag{3.4}$$

$$\text{Le taux de l'écart-type :} \quad STD = \frac{\sigma_G}{\sigma_S} \tag{3.5}$$

Dans toutes ces équations, $G_i$ représente les précipitations observées au sol, $S_i$ représente les produits de télédétection PERSIANN-CDR, CHIRPS et les données de réanalyse CRU. $\bar{G}$ est la moyenne des précipitations observées à la jauge tandis que $\bar{S}$ est la moyenne des précipitations télédétectées ou de la réanalyse, et $n$ est le nombre de valeurs observées.

Les résultats des mesures statistiques du tableau 3.2 montrent bien que les produits CHIRPS possèdent une bonne représentation de la quantité moyenne de précipitations

Table 3.2 – Comparaison des principales mesures statistiques utilisées pour évaluer la performance des données maillées moyennées sur 34 ans, de 1983 à 2016.

| Données | Paramètres | Nord | Centre | Sud | Est | Region montageuse | Ouest |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| In-situ | Moyenne | 89.75 | 99.8 | 101.4 | 93.9 | 129.65 | 71 |
| | Std | 70.7 | 83.5 | 86.55 | 82.83 | 95.93 | 57.7 |
| PERSIANN-CDR | Moyenne | 70.25 | 75.9 | 92.35 | 79.07 | 81.38 | 84.45 |
| | Std | 51.05 | 58.4 | 74.85 | 64.73 | 62.45 | 59.25 |
| | Biais | 19.5 | 23.85 | 9.05 | 14.8 | 49.88 | -13.45 |
| | EQM | 48.4 | 55.7 | 50.2 | 50.1 | 63.38 | 43.55 |
| CRU | Moyenne | 95.15 | 95.55 | 99.1 | 100 | 107.1 | 98.55 |
| | Std | 69.25 | 68.6 | 71.3 | 72 | 75.13 | 67.3 |
| | Biais | -5.25 | 4.25 | 2 | -6.07 | 22.48 | -27.55 |
| | EQM | 52 | 54.35 | 59.65 | 59.87 | 55.85 | 56.55 |
| | MAE | 35 | 35.3 | 39 | 38.8 | 46.1 | 40.35 |
| | CC | 0.75 | 0.81 | 0.82 | 0.8 | 0.82 | 0.77 |
| CHIRPS | Moyenne | 90.8 | 98.95 | 94.85 | 96.47 | 124.53 | 80.6 |
| | Std | 68.6 | 72.4 | 73.95 | 74.17 | 80.15 | 53.25 |
| | Biais | -5.60 | 0.85 | 6.5 | -2.70 | 7.94 | -9.60 |
| | EQM | 33.4 | 43.15 | 44.7 | 43.1 | 47.7 | 38.6 |
| | MAE | 23.7 | 29.25 | 30 | 29.4 | 38.35 | 27.9 |
| | CC | 0.83 | 0.86 | 0.89 | 0.88 | 0.84 | 0.82 |

par rapport aux autres produits. Bien que les produits CHIRPS sous-estiment légèrement les précipitations moyennes dans la région montagneuse et dans le Sud, et surestiment légèrement les précipitations moyennes dans la région Est et Ouest du Burundi, les données CHIRPS restent les plus performants dans toutes les régions par rapport aux produits PERSIANN-CDR et CRU.

Cependant, la moyenne n'est pas suffisante pour représenter avec efficacité le produit le plus performant. En effet, en considérant les autres caractéristiques statistiques à savoir le Std, le Biais, la EQM, la MAE et le CC, nous remarquons que la performance des données pluviométriques satellitaires et de la réanalyse, sur base de ces caractéristiques, varie d'un produit à l'autre et d'une région à l'autre. Mais, dans l'ensemble, l'analyse statistique aux échelles spatiales et temporelles montre que les données CHIRPS sont les plus performants. Par conséquent, elles peuvent être utilisées dans notre étude pour compléter les données observées sur toutes les régions du Burundi.

### 3.1.4 Les modèles climatiques de CMIP6

Les projections futures des précipitations sont principalement basées sur les modèles de la circulation générale (MCG). Ces modèles sont des programmes informatiques capables de reproduire les phénomènes physiques que l'on observe dans le climat sur

base des lois fondamentales de la physique. Ces phénomènes sont essentiellement dus aux échanges d'énergie qui se font entre l'océan et l'atmosphère, entre l'atmosphère et le continent et entre le continent et l'océan. Les modèles climatiques sont développés pour comprendre le climat historique et prédire sa variabilité future selon différents scénarios [Fauzi *et al.*, 2020]. Ils permettent de modéliser les principales caractéristiques du climat telles qu'on les observe (organisation en cellule de Hadley dans les tropiques, présence de moussons, de dépressions dans les hautes latitudes) et sont par conséquent des outils de compréhension et de prédiction du climat [Hallegatte, 2005].

Les MCG sont disponibles dans ce qui est désigné sous le vocable CMIP "Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés" initié par le programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Le PMRC réunit la communauté internationale tous les 5 à 7 ans afin d'utiliser les dernières versions de ses modèles climatiques dans une série coordonnée de simulations de modèles et définir ainsi de nouveaux modèles [Eyring *et al.*, 2016]. Ainsi, le CMIP a pour but de mieux comprendre les changements climatiques passés, présents et futurs résultant de la variabilité naturelle (non forcée) ou en réponse à des changements dans les forçages radiatifs dans un contexte multi-modèle [O'Neill *et al.*, 2016]. Les résultats du CMIP ont été largement utilisés dans plusieurs études sur le changement climatique et ont contribué dans l'élaboration des rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [GIEC, 2012].

Le CMIP a connu différentes phases selon le changement et l'amélioration des expériences. Les modèles de chaque version présentent une valeur ajoutée par rapport à ceux de la version précédente [Taylor *et al.*, 2012], [Meehl *et al.*, 2000]. La plus dernière phase spécifique connue jusqu'à présent est la phase six (CMIP6) [Eyring *et al.*, 2015].

Diverses études ont utilisé soit, des MCG, soit des modèles climatiques régionaux (MCR), à l'échelle continentale, sous-continentale ou nationale sur le continent africain [Indeje *et al.*, 2001], [Endris *et al.*, 2013], [Ogwang *et al.*, 2015]. Sur l'Afrique de l'Est, des études pareilles de [Yang *et al.*, 2015], [Ongoma *et al.*, 2018a] et [Mumo et Yu, 2020] ont utilisé avec succès les ensembles de données MCG pour comprendre la variabilité des précipitations dans cette région. Au Burundi, des études comme celles de [Manirakiza *et al.*, 2019] sur l'analyse spatio-temporelle de l'impact du changement climatique sur le potentiel éolien futur dans les hautes et basses terres au Burundi et du [MEEATU, 2014a] dans le cadre du projet GIZ pour l'élaboration du rapport sur le changement climatique au Burundi ont aussi utilisé les MCR.

Beaucoup d'études déjà réalisées ont utilisé les modèles du Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés phase cinq "CMIP5". C'est pour cette raison que dans notre étude, nous avons opté le choix d'utiliser les sorties des modèles de la version la plus

récente "CMIP6" afin d'obtenir les résultats les plus fiables. Ainsi, nous avons utilisé 5 modèles de CMIP6 dont une brève description est indiquée dans le tableau 3.3.

Le choix de cette gamme de modèles vient de la complexité du paramètre climatique à étudier ainsi que l'étendue du lieu d'étude. A cet égard, il est recommandé par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) de combiner au moins deux modèles climatiques pour escompter avoir des projections fiables au lieu de considérer les changements prévus par un seul modèle [Ongoma *et al.*, 2018a]. Ainsi, un modèle moyen (MME) de l'ensemble de ces cinq modèles climatiques est aussi utilisé dans ce travail.

TABLE 3.3 – Liste des modèles CMIP6 utilisés [Ayugi *et al.*, 2021a]

| Nom du modèle CMIP6 | Pays d'origine | Résolution |
|---|---|---|
| EC-Earth3-CC | Europe | $0.7^o \times 0.7^o$ |
| MIROC6 | Japon | $1.4^o \times 1.4$ |
| GFDL-ESM4 | USA | $1.3^o \times 0.7^o$ |
| NorESM2-MM | Norvège | $0.9^o \times 1.25^o$ |
| CNRM-CM6-1 | France | $1.4^o \times 1.4^o$ |

Le tableau montre que ces modèles ont des résolutions différentes. C'est pourquoi, avant de les utiliser, ils doivent d'abord être mis sur une même résolution spatiale de $0.05° \times 0.05°$ qui correspond à celle de CHIRPS.

### 3.1.5 Les scénarios climatiques du CMIP6

Dans la sixième phase de CMIP, les modèles ont besoin des seuls renseignements sur les changements relatifs aux gaz à effet de serre et aux autres facteurs climatiques [Riahi *et al.*, 2017]. Ces derniers sont contenus dans les scénarios d'émission. C'est pour cette raison que ces modèles sont forcés avec un nouvel ensemble de scénarios représentant une gamme d'hypothèses différentes au sujet des changements relatifs aux facteurs climatiques [O'Neill *et al.*, 2016], [Zelinka *et al.*, 2020].

Les simulations de modèles du système terrestre visant à examiner les changements futurs du climat, de l'air et des systèmes d'eau utilisent des scénarios globaux à long terme. Ces scénarios représentent les émissions futures plausibles en fonction des tendances socio-économiques, environnementales et technologiques [Rao *et al.*, 2017]. Ils sont généralement produits par des modèles d'évaluation intégrée (MEI) [Moss *et al.*, 2010], qui projettent la croissance économique, la population, la consommation d'énergie, l'utilisation des terres et l'agriculture, l'urbanisation ainsi que les émissions de gaz à effet de serre et de polluants qui y sont associées [Van Vuuren *et al.*, 2017].

Les modèles du système terrestre (MST) utilisent cinq scénarios de référence appelés SSP "Shared Socio-economic Pathways" qui décrivent cinq futurs mondiaux différents avec des conditions socio-économiques substantiellement différentes. Les SSP décrivent des récits plausibles du développement de la société mondiale à l'avenir, sans tenir compte du changement climatique ni des mesures d'atténuation ou d'adaptation.

Dans cette étude, nous avons considéré le scénario pessimiste **SSP5-85** avec le niveau de forçage radiatif le plus fort 8.5 $Wm^{-2}$ pour les projections futures des extrêmes des précipitations. Ce scénario a été choisi du fait qu'il accorde la priorité à des tendances relativement optimistes en matière de développement humain. Il projette un avenir avec des investissements importants dans l'éducation et la santé, une croissance économique rapide et des institutions qui fonctionnent bien. En d'autres termes, il suppose un monde futur avec une économie à forte intensité énergétique et basée sur le développement des combustibles fossiles établissant ainsi un monde à émissions élevées [O'Neill *et al.*, 2016].

### 3.1.6 La correction des biais des modèles climatiques

Même si les modèles climatiques reflètent des connaissances les plus récentes sur le système climatique, leurs résultats présentent des biais spatio-temporels complexes par rapport aux observations [Qian et Chang, 2021]. Les facteurs contribuant à ces biais comprennent les erreurs dans les paramètres décrivant les processus physiques et chimiques, la représentation incorrecte des processus sous-jacents par des équations mathématiques ainsi que la discrétisation des champs météorologiques dans l'espace et dans le temps [Fauzi *et al.*, 2020], [Salathé Jr *et al.*, 2007].

Selon [Fauzi *et al.*, 2020], les résultats des modèles du système terrestre n'ont pas été à mesure de représenter le climat à l'échelle locale. Cela est dû au fait qu'ils génèrent des résultats à l'échelle mondiale avec une faible résolution spatiale relativement grossière. Par conséquent, ils ne peuvent pas représenter les détails à l'échelle fine qui caractérisent le climat dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les régions présentant une orographie complexe ou une couverture terrestre ou des côtes hétérogènes [Luhunga *et al.*, 2016].

Ainsi, il est recommandé de corriger les biais avant l'usage des modèles climatiques. Dans la suite, nous présentons la technique appliquée pour corriger les biais.

#### 3.1.6.1 La Quantile Delta mapping (QDM)

La méthode de correction des biais utilisée dans notre étude est la Quantile Delta Mapping (QDM) [Cannon *et al.*, 2015]. Nous avons choisi cette méthode car elle maintient explicitement les changements relatifs entre les simulations historiques et futures dans tous les quantiles [Manirakiza *et al.*, 2019].

La correction des biais par la méthode QDM se fait en deux étapes. Tout d'abord, le biais entre les observations et les simulations pendant la période historique est évalué. Ensuite, un algorithme de correction est appliqué aux simulations futures en supposant que le biais peut être extrapolé aux périodes futures [Cannon *et al.*, 2015].

En effet, la mise en équation de la fonction de distribution cumulative (CDF) entre les résultats d'un modèle historique ( $F_{m,h}$ ) et l'observation ( $F_{o,h}$ ) est l'idée de base de la méthode Quantile Mapping (QM) ou quantile-quantile afin de maintenir les changements relatifs dans les modèles climatiques. $X_{o,h}$ est une représentation des données d'observation historiques, et $X_{m,h}$ est une représentation des données historiques du modèle.

La méthode QDM commence par la fonction de distribution cumulative (CDF) de la série de données $X_{m,p}$ projetée par le modèle, par exemple estimée à partir de la CDF empirique sur une fenêtre temporelle autour de t :

$$\tau_{m,p}(t) = F_{m,h}^{(t)}[X_{m,h}(t)], \qquad \tau_{m,p}(t)\epsilon[0,1] \tag{3.6}$$

Où $\tau_{m,p}(t)$ est la probabilité de non dépassement associée à la valeur à l'instant t ; $F_{m,h}^{(t)}$ est la fonction de distribution cumulative (CDF) établie à partir des données projetées au point temporel t.

Le $\tau_{m,p}(t)$-quantile modélisé correspondant à la période historique peut être trouvé en entrant la valeur $\tau_{m,p}(t)$ dans la fonction de distribution cumulative inverse historique $F_{m,h}^{-1}$. Dès lors, le changement relatif dans les quantiles entre la période historique et l'instant t est donné par :

$$\Delta_m(t) = \frac{F_{m,p}^{(t)-1}[\tau_{m,p}(t)]}{F_{m,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)]} = \frac{X_{m,h}(t)}{F_{m,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)]} \tag{3.7}$$

Le $\tau_{m,p}(t)$-quantile modélisé à l'instant t peut être corrigé du biais en appliquant la CDF inverse estimée à partir des valeurs observées $X_{o,h}$ au cours de la période historique.

$$\hat{X}_{o:m,h:p}(t) = F_{o,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)] \tag{3.8}$$

Le processus multiplicatif appliqué aux changements relatifs permet de corriger les biais

dans les projections futures. Ainsi,

$$\hat{X}_{m,p}(t) = \hat{X}_{o:m,h:p}(t)\Delta_m(t) \tag{3.9}$$

Finalement, la formule de correction du biais pour les données de projection du modèle s'écrit :

$$\hat{X}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\left\{F_{m,p}^{(t)}\left[\hat{x}_{m,p}(t)\right]\right\}\left[\frac{\hat{x}_{m,p}(t)}{F_{o,h}^{-1}\left\{F_{m,p}^{(t)}[\hat{x}_{m,p}(t)]\right\}}\right] \tag{3.10}$$

#### 3.1.6.2 Le diagramme de Taylor

Le diagramme de Taylor a été utilisé dans ce travail pour évaluer la performance des modèles avant et après la correction de biais par QDM. Ce diagramme permet de valider les modèles en montrant à quel point les données simulées par un modèle (ou un ensemble de modèles) correspondent aux observations.

La performance est évaluée sur base des critères exprimés par les équations suivantes :

$$Coefficient\ \ de\ \ corrélétion: \quad r_{\hat{X}X} = \frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n}\left(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}}\right)\left(X_i - \bar{x}\right), \tag{3.11}$$

$$Ecart - type: \quad SD_{\hat{X}} = \sqrt{\frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n}\left(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}}\right)^2}, \tag{3.12}$$

$$SD_X = \sqrt{\frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)^2}, \tag{3.13}$$

$$Erreur\ \ quadratique\ \ moyenne: \quad EQM = \sqrt{\frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n}\left[\left(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}}\right)\left(X_i - \bar{X}\right)\right]^2}, \tag{3.14}$$

où $X_i$ est la valeur correspondant à i du modèle et $\hat{X}_i$ est la valeur corrigée de i. La figure 3.2 montre que la plupart des modèles s'écartent des données CHIRPS en ce qui concerne l'écart-type et le coefficient de corrélation. Par contre, après la correction des biais (Figure 3.3), ces différents modèles se rapprochent des données CHIRPS.

Après la correction de biais par QDM, on remarque que les modèles corrigés (figure 3.3) sont plus performants que ceux à l'état brut (figure 3.2).

## 3.2 Matériels utilisés

Dans cette section, nous présentons les matériels ou outils pertinents utilisés dans ce travail de recherche.

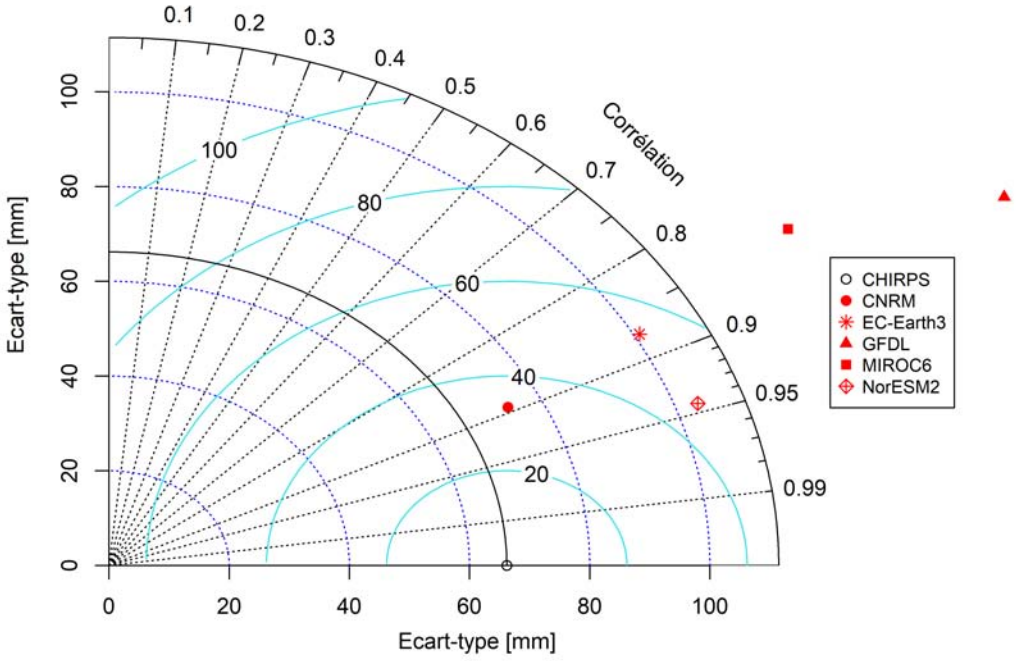



FIGURE 3.2 – Evaluation des cinq modèles avant la correction de biais.

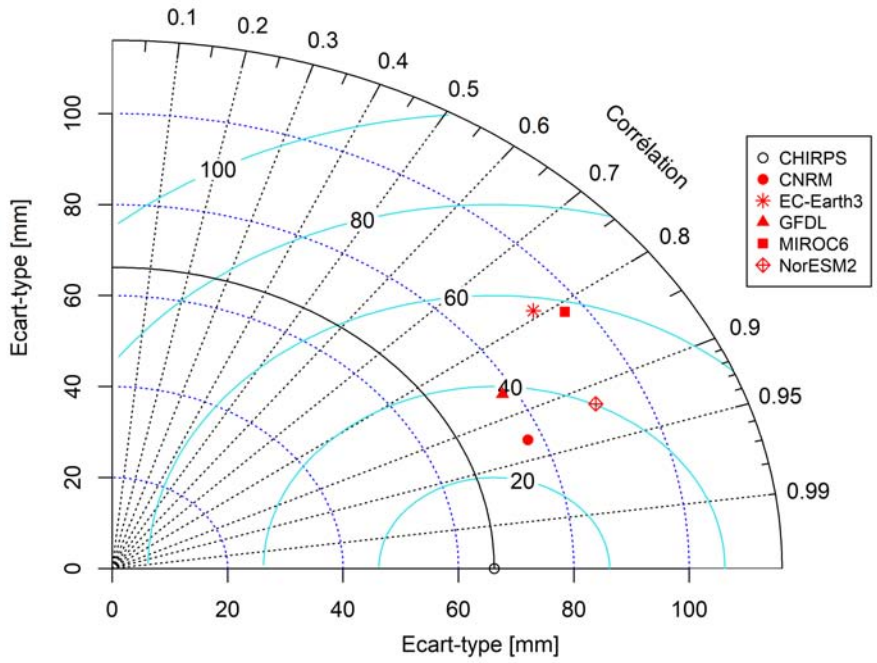



FIGURE 3.3 – Evaluation des cinq modèles après la correction de biais.

### 3.2.1 Logiciel R

Le logiciel R est un outil très essentiel couramment utilisé pour l'analyse des données, le calcul statistique, la visualisation des résultats et pour la programmation. Grâce à lui, on peut facilement analyser de grands tableaux de données en tout ou en partie. Pour ce fait, ce logiciel nous a permis de faire les calculs des indices de précipitations extrêmes,

des paramètres statistiques ainsi que la visualisation des résultats à l'aide des packages ClimPact2, ggplot2, raster, rgdal,...etc.

### 3.2.2 Logiciel Quantum Geographic Information System (QGIS)

Le logiciel QGIS est un logiciel d'information géographique "SIG". Il permet de représenter les objets et leurs informations dans l'espace. Il est capable d'aider à la gestion des différents systèmes de coordonnées, la lecture de fichier raster, la création de couches vectorielles, les symbologies graduées et catégorisées, la création de produits cartographiques finis, etc. Dans notre travail, ce logiciel nous a permis de visualiser et d'analyser les données spatiales, la cartographie du lieu d'étude ainsi que l'interpolation spatiale.

### 3.2.3 Logiciel Climate Data Operator (CDO)

Le logiciel CDO est une collection d'opérateurs en ligne de commande permettant de manipuler et d'analyser les données des modèles climatiques ainsi que celles de prévision météorologique numérique. Ainsi, il comprend le support pour netCDF-3 (network Common Data Form), netCDF-4 et GRIB1 (Grided Binary), GRIB2 et d'autres formats. En plus de cela, CDO peut être utilisé pour analyser tout type de données maillées non liées à la science du climat.

CDO nécessite très peu de mémoire et peut traiter des fichiers plus volumineux que la mémoire physique. Il propose plusieurs opérateurs dont : Informations et opérations sur les fichiers, sélection et comparaison, opérations arithmétiques, analyses statistiques, régression et interpolation, transformations vectorielles et spectrales, indices climatiques,...etc. Dans notre travail, il nous a permis de manipuler et traiter les données des modèles climatiques pour des fins de calculs.

### 3.2.4 Logiciel ClimaPact2

Le logiciel ClimaPact2 met à jour le logiciel ClimPact qui était basé sue le logiciel RClimdex dévelopé par l'équipe d'experts de l'Organisation Mondiale de la Météorologie sur la détection des indices climatiques [Smith, 1982]. ClimPact2 est codé en R, un langage et un environnement pour le calcul des indices climatiques et les graphiques. Il lit les données météorologiques (précipitations, températures minimales et températures maximales) à l'échelle journalière sous forme vectorielle. Ainsi, il calcule la fréquence, la durée et l'intensité de divers extrêmes climatiques pertinents à des échelles de temps mensuelles et annuelles.

Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes servis de ce logiciel comme l'interface du logiciel R afin de calculer les indices de précipitations extrêmes utilisés.

## 3.3 Méthodes

Dans cette section, nous allons présenter les différentes méthodes appliquées pour aboutir aux résultats de notre recherche.

### 3.3.1 Choix et calcul des indices climatiques

Les moyennes mensuelles des données climatiques ne tiennent pas compte d'un grand nombre d'informations importantes qui sont pertinentes pour les impacts sectoriels [IPCC, 2007]. C'est pourquoi les indices dérivés des données journalières tentent d'extraire objectivement des informations des observations météorologiques quotidiennes pour répondre aux questions concernant les aspects du système climatique, en mettant particulièrement l'accent sur les extrêmes.

Les indices climatiques ont été largement étudiés dans la littérature [Smith, 1982] et des études sur ceux-ci se sont avérées très utiles ; par exemple sur l'étude de l'évolution des futurs extrêmes de température au niveau mondial [Slater *et al.*, 2021] et sur la production agricole [Dalezios et Zarpas, 1996]. Il existe des indices convenus au niveau international qui dérivent des températures et des précipitations journalières représentant les aspects les plus extrêmes du climat et permettant de définir son état. Ainsi, 27 indices climatiques on été élaborés par l'ETCCDI pour décrire les extrêmes [Martin *et al.*, 2018].

Dans ce travail, nous avons calculé trois indices de précipitations extrêmes qui font l'objet de notre étude à savoir Rx1day, Rx3day et Rx5day. Ces trois indices ont été calculés à l'aide de ClimPact2 sous le logiciel R. Le tableau 3.4 donne une description détaillée de ces indices tels que définis par l'ETCCDI.

Table 3.4 – Indices climatiques calculés

| Indice | Nom | Définition | Unité |
|---|---|---|---|
| Rx1day | Hauteur maximale des précipitations d'un jour | Précipitations maximales d'un jour pluvieux | mm |
| Rx3day | Cumul des précipitations de 3 jours | Précipitations totales maximales sur les 3 jours pluvieux consécutifs pendant l'année | mm |
| Rx5day | Cumul des précipitations de 5 jours | Précipitations totales maximales sur les 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année | mm |

### 3.3.2 Loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV)

La théorie des valeurs extrêmes (TVE) permet d'évaluer les événements rares et les pertes associées à leur apparition [Kirchmeier-Young *et al.*, 2019]. D'autres domaines ont utilisé cette théorie notamment l'ingénierie, les finances, la météorologie, etc.), pour estimer le risque associé aux événements extrêmes [Raggad, 2009]. Dans le cas qui nous concerne, le succès croissant de cette théorie nous a incités à l'utiliser pour étudier les extrêmes rares des précipitations au Burundi.

La TVE ne vise pas à modéliser ou à estimer la fonction de répartition inconnue, mais uniquement ses queues de distribution car elles sont les seules utiles à la représentation des extrêmes. Nous utilisons l'approche BMM "Bloc Maxima Method" s'appuyant sur le découpage des données en blocs et dont les maxima sont supposés distribués selon une loi d'une famille GEV.

Pour ce cas, nous nous ramenons à un cadre de statistique paramétrique et d'ajustement de paramètres sur les données. En outre, nous ne nous intéresserons qu'aux valeurs maximales pour notre échantillon.

#### 3.3.2.1 Modèle des maxima par blocs (BM)

Le modèle des maxima par blocs permet de modéliser les queues de distribution de la fonction cumulative [Kharin *et al.*, 2013]. Son but est d'étudier la loi du maximum d'une suite des variables aléatoires réelles même si la loi du phénomène n'est pas connue.

En effet, considérons une suite de n variables aléatoires ( $X_1$, $X_2$,..., $X_n$) indépendantes et identiquement distribuées de fonction de répartition F définie par :

$$F(x) = Pr(X_i \leq x), \qquad pour \quad i = 1, ..., n \tag{3.15}$$

Considérons le maximum d'un échantillon de taille n qui est une variable aléatoire $Mn = max(x_1, x_2, ..., x_n)$ pour étudier le comportement extrême des événements. Les variables aléatoires étant indépendantes et identiquement distribuées, la fonction de répartition de Mn est donnée par :

$$F_{Mn}(x) = Pr(Mn \leq x) = (F(x))^n \tag{3.16}$$

L'intérêt de cette formule est très limité parce que la loi d'une variable aléatoire parente X est rarement connue avec précision et, même si elle est connue avec exactitude, la loi du terme maximum n'est pas toujours facilement calculable. Pour ces raisons, il est intéressant de considérer les comportements asymptotiques du maximum convenablement normalisé. Le but est de définir la loi que suit le maximum.

Quelle que soit la loi limite de la variable parente, la loi limite des extrêmes a toujours la même forme. Bien que le comportement de ces lois soit complètement différent, elles peuvent être combinées en une seule paramétrisation contenant un unique paramètre. Ce dernier contrôle la « lourdeur » de la queue de la loi appelée indice des valeurs extrêmes (ou indice de queue) :

$$GEV(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1+\xi\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\frac{-1}{\xi}}\right] & \text{si } \xi \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \tag{3.17}$$

où $x\epsilon\mathbb{R}$, $1+\xi\frac{x-\mu}{\sigma} > 0$, et $\mu\epsilon\mathbb{R}$, $\sigma > 0$, $\xi\epsilon\mathbb{R}$.
Les trois paramètres de la fonction GEV sont :
$-$ $\mu$ : un paramètre de position s'assimilant en quelque sorte à la moyenne pour une loi normale.
$-$ $\sigma$ : un paramètre d'échelle s'assimilant en quelque sorte à l'écart-type pour une loi normale centrée réduite.
$-$ $\xi$ : un paramètre de forme, qui forme la distribution.
Le signe du paramètre $\xi$ donne les lois de probabilité vers lesquelles la distribution GEV converge. Ainsi donc, la distribution peut être de Weibull ($\xi > 0$), de Gumbel ($\xi \to 0$) ou de Fréchet ($\xi < 0$). Ces trois types de distributions ont un comportement distinct en terme de queue.

Ainsi, la distribution à queue supérieur bornée est de Weibull avec une valeur finie dont le maximum ne peut dépasser. La distribution de Gumbel est à queue supérieure légère et positivement asymétrique. Cela signifie que les maxima peuvent prendre des valeurs infiniment élevée mais la probabilité d'obtenir de tels niveaux devient exponentiellement petite ; c'est celle utilisée couramment en hydrologie. Pour Fréchet, la distribution a une queue supérieure lourde et de moment infini d'ordre supérieur. Les valeurs supérieures des maxima sont obtenues avec une plus grande probabilité comparée au cas de la queue légère ; c'est le cas des précipitations et des impacts économiques.

La densité de GEV est donnée par :

$$g(x) = \frac{1}{\sigma} \times e^{-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{\frac{-1}{\xi}}} \times \left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1-\frac{1}{\xi}} \qquad pour\ \xi \neq 0 \tag{3.18}$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma}\exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \times \exp\left[-\exp\left(-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)\right] \qquad pour\ \xi = 0 \tag{3.19}$$

Où $x$ est une variable aléatoire d'un échantillon des maxima des précipitations moyennes

annuelles pour les indices $Rx1day$, $Rx3day$ et $Rx5day$.

#### 3.3.2.2 Estimation des paramètres de GEV

La méthode d' « Estimation par le Maximum de Vraisemblance (EMV) » a été appliquée à l'échantillon des maxima construit pour estimer les paramètres d'ajustement de GEV.
Soient $Y = (Y_1, \cdots, Y_k)$ l'échantillon de maxima supposé $iid$ et $h_{\xi,\mu,\sigma}$ la densité de la loi $GEV(x)$. Cette dernière s'écrit pour $\xi \neq 0$ :

$$\frac{d}{dy} GEV(y) = h_{\xi,\mu,\sigma}(y) \tag{3.20}$$

$$h_{\xi,\mu,\sigma}(y) = \frac{1}{\sigma}\left[1 + \xi\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1-\xi}{\xi}} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}\right\}. \tag{3.21}$$

Et la vraisemblance de l'échantillon $Y$ est égale à :

$$\mathcal{L}(\xi, \mu, \sigma; Y) = \prod_{i=1}^{n} h_{\xi,\mu,\sigma}(Y_i) \tag{3.22}$$

car l'échantillon est $iid$.

Des procédures numériques (algorithme de Quasi-Newton) sont nécessaires pour la maximisation de la vraisemblance. Alors le calcul des estimateurs ne pose pas de grandes difficultés [Smith, 2003].

Dans le cas où $\xi = 0$, la log-vraisemblance est égale à :

$$l(0, \mu, \sigma, Y) = \ln \mathcal{L}(0, \mu, \sigma, Y) \tag{3.23}$$

$$l(0, \mu, \sigma; Y) = -n \ln \sigma - \sum_{i=1}^{n} \exp\left(-\frac{Y_i - \mu}{\sigma}\right) - \sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i - \mu}{\sigma} \tag{3.24}$$

En dérivant cette fonction relativement aux deux paramètres $\mu$ et $\sigma$ , nous obtenons le système d'équations à résoudre suivant :

$$\frac{\partial l(0, \mu, \sigma; Y)}{\partial \mu} = 0 \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial l(0,\mu,\sigma;Y)}{\partial \sigma} = 0 \tag{3.26}$$

Il vient donc :

$$n - \sum_{i=1}^{n} \exp\left(-\frac{Y_i - \mu}{\sigma}\right) = 0 \tag{3.27}$$

$$n + \sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i - \mu}{\sigma}\left[\exp\left(-\frac{Y_i - \mu}{\sigma}\right) - 1\right] = 0 \tag{3.28}$$

Précisons cependant qu'il n'existe pas de solution explicite à ces équations de maximisation. L'utilisation de méthodes numériques, type algorithmes de Newton-Raphson est donc nécessaire. L'avantage de cette technique est le fait qu'elle offre une grande flexibilité.

#### 3.3.2.3 Projection des changements futurs

Pour chacun des trois indices considérés dans ce travail, sa projection future se fait sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$ à l'aide de cinq modèles climatiques ainsi que le modèle moyen (MME) suivant le scénario SSP5-85.

#### 3.3.2.4 Rapport de risque (RR)

Un rapport de risque ($RR$) [Kirchmeier-Young *et al.*, 2019] est une méthode couramment utilisée pour quantifier le changement de la probabilité d'occurrence des événements climatiques extrêmes. Il s'agit d'un rapport entre la probabilité qu'un événement dépasse un seuil dans un scénario climatique futur sous l'effet de forçages anthropiques ($p_1$) et sa probabilité dans le climat actuel ($p_0$) :

$$RR = \frac{p_1}{p_0} \tag{3.29}$$

Les probabilités sont calculées comme l'intégrale de la fonction de densité de probabilité (PDF), au-dessus d'un certain percentile, de la distribution GEV ajustée. Dans notre travail, nous avons utilisé le $90^{\text{ème}}$ percentile (événement climatique extrême rare comme inondation).

Le RR indique combien de fois la probabilité d'occurrence de l'événement est due à l'inclusion de facteurs anthropiques. Ainsi, un $RR > 1$ indique une probabilité croissante dans le climat futur ce qui signifie que les forçages anthropiques ont augmenté la probabilité de l'événement extrême ; un $RR < 1$ indique une probabilité future décroissante

tandis qu'un $RR = 1$ n'indique aucun changement de probabilité entre les deux climats [Slater *et al.*, 2021].

### 3.3.3 Interpolation spatiale

La méthode d'interpolation utilisée dans notre étude est l'interpolation de la moyenne pondérée par la distance inverse (IDWA). A l'aide du logiciel QGIS, cette méthode permet d'estimer les précipitations des stations météorologiques par une combinaison linéaire de la variable climatique simulée aux points de la grille environnante [Hartkamp *et al.*, 1999]. Cette méthode est définie de la façon suivante :

$$V_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^2} \upsilon_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^2}} \tag{3.30}$$

Où $V_f$ est la valeur interpolée à la station requise, $\upsilon_i$ représente les données au point i de la grille, $d_i$ est la distance du point i de la grille à la station d'observation et n est le nombre total de points de la grille entourant la station (qui est toujours 4).

La formule de Haversine permet de calculer la distance entre les points de la grille environnant. Elle définie par :

$$d = 2rsin^{-1}\sqrt{sin^2\frac{(\phi_1 - \phi_2)}{2} + cos\phi_1 cos\phi_2 sin^2\frac{(\psi_1 - \psi_2)}{2}} \tag{3.31}$$

où d est la distance entre deux points à la surface de la terre ; r est le rayon de la terre ;$\phi$ est la longitude et $\psi$ est la latitude.

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une description détailée des données utilisées à savoir les données observées, les modèles climatiques ainsi que le scénario des projections futures. Toutes les méthodes décrites ont été appliquées aux deux types de données pour enfin générer les résultats de notre étude qui feront l'objet d'interprétation et de discussion dans le chapitre qui suit.

# Chapitre 4

# Résultats, interprétation et discussion

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter et interpréter les principaux résultats de ce travail. Ensuite, nous allons discuter ces résultats. Enfin, nous allons formuler une conclusion du chapitre.

## 4.1 Présentation et interprétation des résultats

### 4.1.1 La distribution spatiale des paramètres de GEV pour les extrêmes (les maxima) de précipitations sur la période actuelle

La figure 4.1 indique la distribution spatiale du paramètre de position $\mu$ pour les trois indices des extrêmes de précipitations Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période actuelle qui est en même temps la période de référence (1981-2020). En effet, nous constatons que, d'une part, les valeurs de $\mu$ augmentent avec le nombre de jours pluvieux, reflétant une augmentation de l'intensité des extrêmes. D'autre part, nous remarquons que la distribution spatiale de $\mu$ n'est pas uniforme au sein d'un même indice.

Pour l'indice de précipitations totales maximales d'un jour pluvieux (Rx1day) sur la période 1981-2020, les valeurs les plus élévées se trouvant dans l'intervalle $[41, 50]$ sont situées dans les régions de haute altitude à savoir la région de Rwegura et de Gisozi. Par contre, les valeurs du paramètre de position $\mu$ les plus basses variant dans l'intervalle $[25, 35]$ sont situées au Sud et dans la plaine de l'Imbo Nord. La grande partie du Burundi, pour Rx1day, a des valeurs de $\mu$ variant autour de 40.

Pour l'indice du cumul de précipitations maximales de trois jours pluvieux (Rx3day), le paramètre de position prend des valeurs plus grandes par rapport à l'indice précédent. Les régions du Nord, du Nord-Est et une partie du centre montrent des valeurs les plus élevées de $\mu$ par rapport au reste du pays avec des valeurs se trouvant dans l'intervalle $[65, 78]$. On observe également une partie au Sud de la plaine de l'Imbo Nord où les valeurs de $\mu$ variant autour de 40 sont les plus basses. La grande partie du Burundi, pour Rx3day, a des valeurs du paramètre de position $\mu$ situées autour de 60.

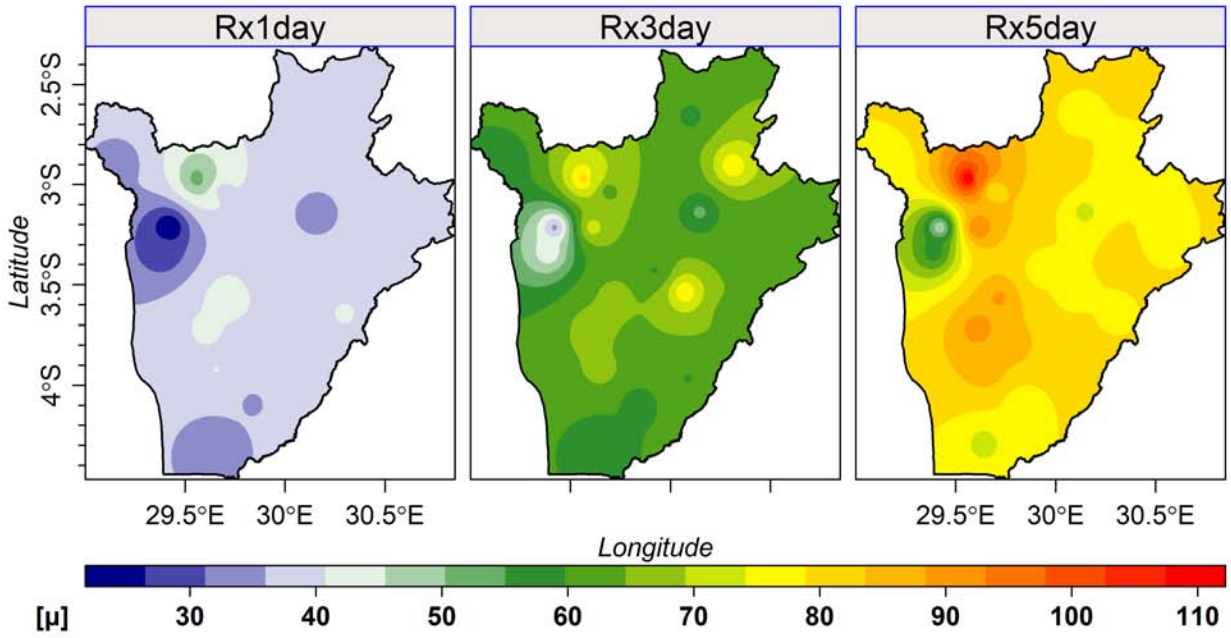



FIGURE 4.1 – Distribution spatiale du paramètre de position $\mu$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020

Pour l'indice du cumul de précipitations maximales de cinq jours pluvieux (Rx5day), les valeurs les plus élevées de $\mu$ sont réparties dans la région de haute altitude Nord et au centre de la région de haute altitude Sud. Ces valeurs varient autour de 90. Par rapport aux indices précédents, presque toutes les régions du pays ont des valeurs élevées du paramètre de position sauf la partie Sud de la plaine de l'Imbo Nord où les valeurs de $\mu$, variant autour de 60, sont les plus basses.

La figure 4.2 montre la distribution spatiale du paramètre d'échelle $\sigma$ pour les trois indices des extrêmes de précipitations Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020. Le paramètre $\sigma$ indique la variabilité de la distribution des extrêmes. L'analyse de la figure des trois indices montre que les valeurs du paramètre d'échelle $\sigma$ augmentent avec le nombre de jours pluvieux. On constate aussi que la distribution spatiale de $\sigma$ n'est pas uniforme pour les trois indices de précipitations extrêmes.

Pour l'indice Rx1day, le paramètre $\sigma$ prend des valeurs élévées dans la partie Nord comprenant la Crète Congo-Nil et surtout toute la forêt naturelle de la Kibira avec des valeurs variant autour de 10. De plus, on observe des endroits situés au centre et dans le Sud de la plaine de l'Imbo Nord ayant des valeurs de $\sigma$ très petites. Ces valeurs se trouvent autour de 3. Par ailleurs, la plus grande partie est dominée par des valeurs de $\sigma$ variant autour de 7.

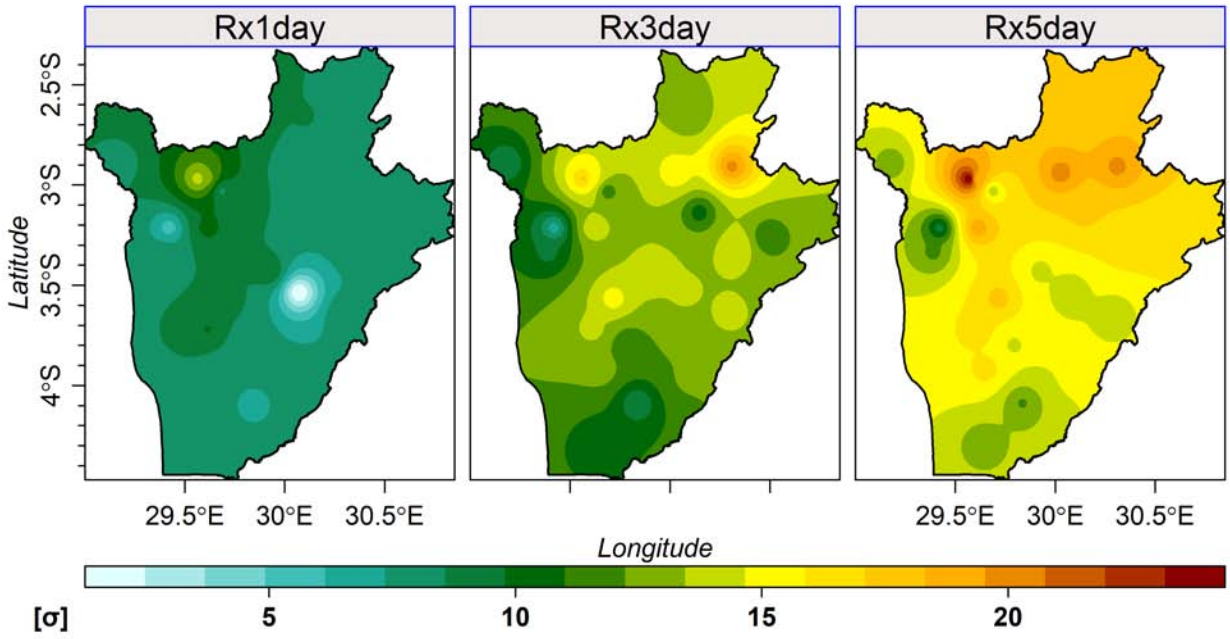



FIGURE 4.2 – Distribution spatiale du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020

Pour l'indice Rx3day, la partie Nord, Nord-Est et le Centre possèdent les valeurs de $\sigma$ les plus élévées se trouvant dans l'intervalle $[14, 17]$. En réalité, la valeur la plus grande (17) se trouve dans la partie Nord-Est. Par contre, la partie Ouest comprenant la plaine de l'Imbo Nord et la partie Sud du Burundi ont des valeurs de $\sigma$ les plus basses variant autour de 10. Par ailleurs, les autres parties restantes possèdent des valeurs du paramètre $\sigma$ variant autour de 13.

Pour l'indice Rx5day, la plus grande partie du pays est dominée par des valeurs de $\sigma$ les plus élévées se trouvant dans l'intervalle $[17, 20]$. Il est important de signaler que les grandes valeurs de $\sigma$ montrent que cette partie est exposée à beaucoup d'événements extrêmes de précipitations. D'autre part, la plaine de l'Imbo Nord et la partie Sud du Burundi exhibent des petites valeurs de $\sigma$ avec des valeurs variant autour de 12. Avec ces résulats, il est nécéssaire de remarquer que le Burundi fait face à une grande variabilité de la distribution des précipitations extrêmes.

La figure 4.3 indique la distribution spatiale du paramètre de forme $\xi$ pour les trois indices des extrêmes de précipitations Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020. Le paramètre $\xi$ caractérise le comportement et la forme de la queue de la distribution. Une grande valeur de $\xi$ positive décrit une distribution à queue épaisse tandis que sa valeur négative reflète une distribution à queue plus courte.

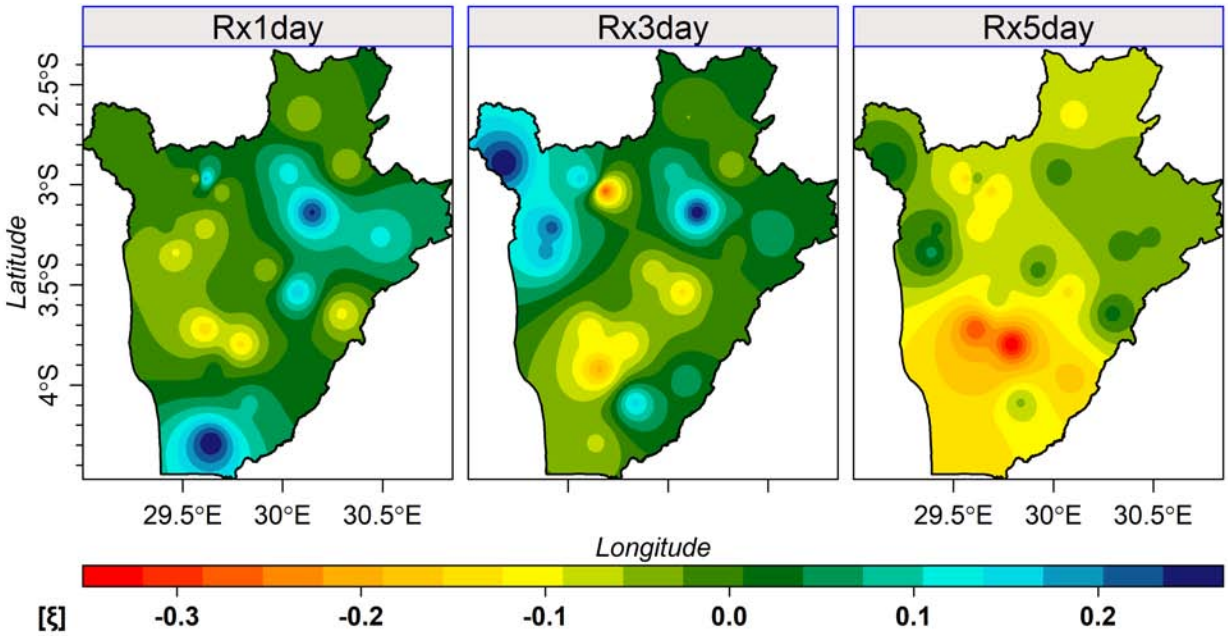



FIGURE 4.3 – Distribution spatiale du paramètre de forme $\xi$ pour Rx1day, Rx3day et Rx5day sur la période 1981-2020

Pour l'indice Rx1day, les valeurs de $\xi$ les plus élévées sont comprises entre 0.11 et 0.23 et se trouvent dans la partie Sud et au Centre-Est du Burundi. Par contre, les valeurs de $\xi$ les plus basses sont situées au Centre-Ouest avec des valeurs variant autour de $-0.1$. Nous remarquons que les valeurs de $\xi$ n'exhibent pas une forme dominante de la queue de la distribution (les valeurs de $\xi$ sont inférieures à 0.5) ; ce qui veut dire que le Burundi n'est pas épargné des événements extrêmes relatifs à $Rx1day$.

Pour l'indice Rx3day, les valeurs de $\xi$ les plus élévées sont localisées à l'Ouest du Burundi dans la plaine de l'Imbo Nord, dans la partie Nord-Ouest de la Crête Congo-Nil et une petite partie du Centre-Est du Burundi. Ces valeurs sont comprises entre 0.11 et 0.23. D'autre part, les valeurs de $\xi$ les plus basses sont localisées au Centre-Sud avec des valeurs variant autour de $-0.1$.

Pour l'indice Rx5day, les valeurs de $\xi$ les plus élévées sont situées au Nord-Ouest et à l'Est avec des valeurs comprises entre $-0.05$ et 0.03. Par contre, les valeurs de $\xi$ les

plus basses se trouvent dans la partie Sud du Burundi avec des valeurs se trouvant dans l'intervalle $[-0.2, -0.1]$.

### 4.1.2 Projection des changements futurs des extrêmes de précipitations sur la période 2021-2060

#### 4.1.2.1 Les changements du paramètre de position $\mu$ dans le futur proche

La figure 4.4 montre les projections futures de la distribution spatiale des changements du paramètre $\mu$ pour l'indice **Rx1day** sur la période $2021 - 2060$ par rapport à la période de référence $1981 - 2020$.

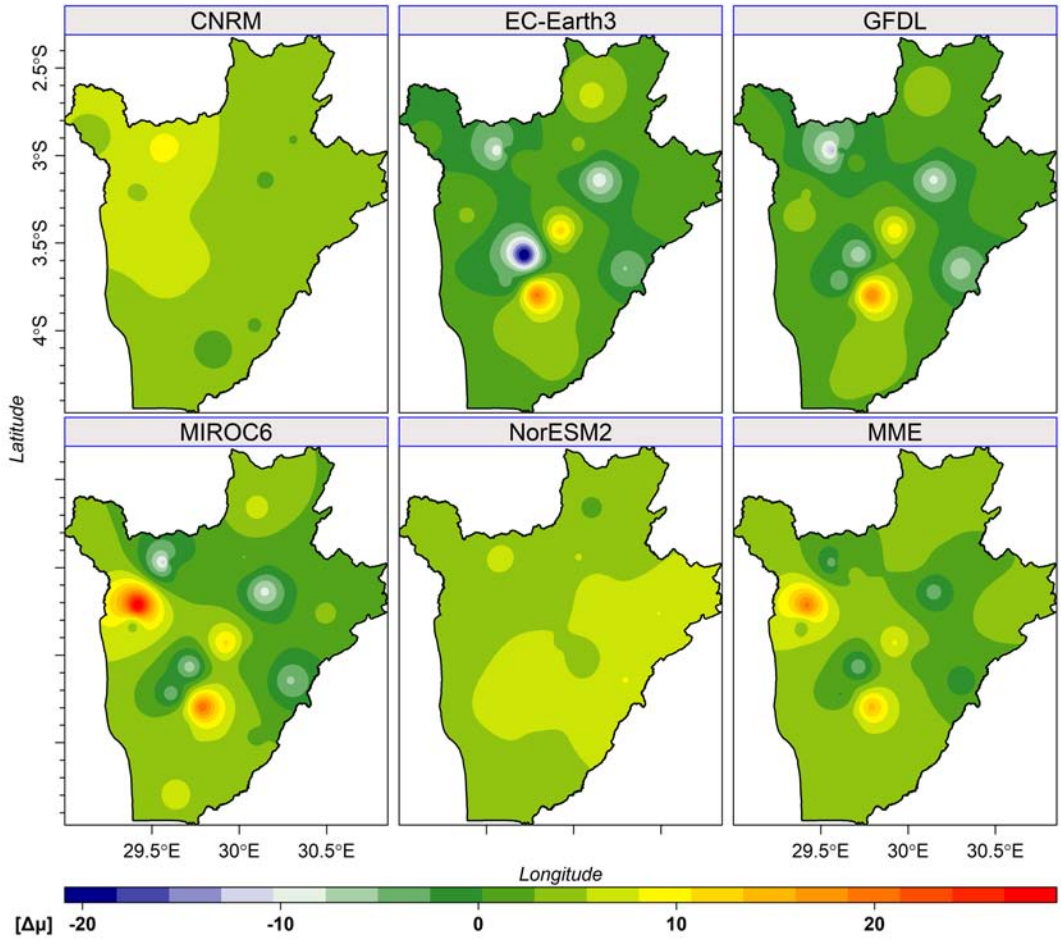



FIGURE 4.4 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx1day sur la période $2021 - 2060$

D'une part, les résultats montrent que les projections futures de la distribution spatiale des modèles EC-Earth3 et GFDL sont presque similaires. Vers le Centre-Sud, le paramètre de position $\mu$ est projeté à la hausse avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient autour de 14. Par ailleurs, sur une grande partie du Burundi, les prédictions n'exhibent pas

des changements remarquables de $\mu$ car les valeurs de $\Delta\mu$ varient autour de 0. D'autre part, les projections futures de la distribution spatiale des modèles CNRM et NorESM2 montrent que les valeurs du paramètre $\mu$ sont projetées à la hausse avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient autour de 5. Une tendance à la hausse de $\mu$ sur la période $2021-2060$ s'observe d'une façon nette au Nord-Ouest pour le modèle CNRM et au Sud-Est pour le modèle NorESM2. Le modèle MIROC6 quant à lui montre que sur une grande partie du Burundi, le paramètre de position va augmenter d'ici 2060 avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient entre 0 et 18. Les grands changements de $\mu$ sont projetés à l'Ouest, au Sud et au Centre du Burundi.

Les résultats sur les projections futures de la distribution spatiale du paramètre $\mu$ par la moyenne de l'ensemble des 5 modèles (MME) montrent que la partie Sud de la plaine de l'Imbo Nord et celle du Centre-Sud présentent un paramètre de position qui tend à la hausse avec les plus grandes valeurs de $\Delta\mu$ variant autour de 13. De plus, on note qu'une grande partie du Burundi manifeste une tendance à la hausse du paramètre $\mu$ avec des valeurs de $\Delta\mu$ variant autour de 3. Les changements positifs des valeurs de $\mu$ détectés pour l'indice Rx1day pourront se traduire en une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes d'ici 2060 sur une grande partie du Burundi.

La figure 4.5 présente la projection future de la distribution spatiale des changements du paramètre $\mu$ pour l'indice **Rx3day** sur la période $2021-2060$ par rapport à la période de référence $1981-2020$.

Les résultats de tous les modèles s'accordent sur la projection à la hausse des valeurs du paramètre $\mu$ sur le Burundi d'ici 2060. En effet, tous les modèles présentent des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient entre 5 et 30. Seul le modèle CNRM présente une petite partie de l'Est avec une valeur de $\Delta\mu$ négative $(-50)$. Par ailleurs, la MME exhibe une tendance à la hausse du paramètre $\mu$ sur tout le Burundi avec des valeurs de $\Delta\mu$ variant entre 10 et 25. Cette tendance à la hausse des valeurs de $\mu$ pourra entraîner une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes dans presque tout le pays.

La figure 4.6 montre la projection future de la distribution spatiale des changements du paramètre $\mu$ pour l'indice **Rx5day** sur la période $2021-2060$ par rapport à la période de référence $1981-2020$.

Les résultats des modèles CNRM et NorESM2 présentent des tendances à la hausse et des valeurs de $\Delta\mu$ plus élevées par rapport aux autres modèles. Ces valeurs de $\Delta\mu$ varient entre 28 et 40. De même, les modèles EC-Earth3 et GFDL montrent des changements projetés à la hausse du paramètre $\mu$ avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui se rapprochent et variant entre 15 et 20 sur presque tout le Burundi.

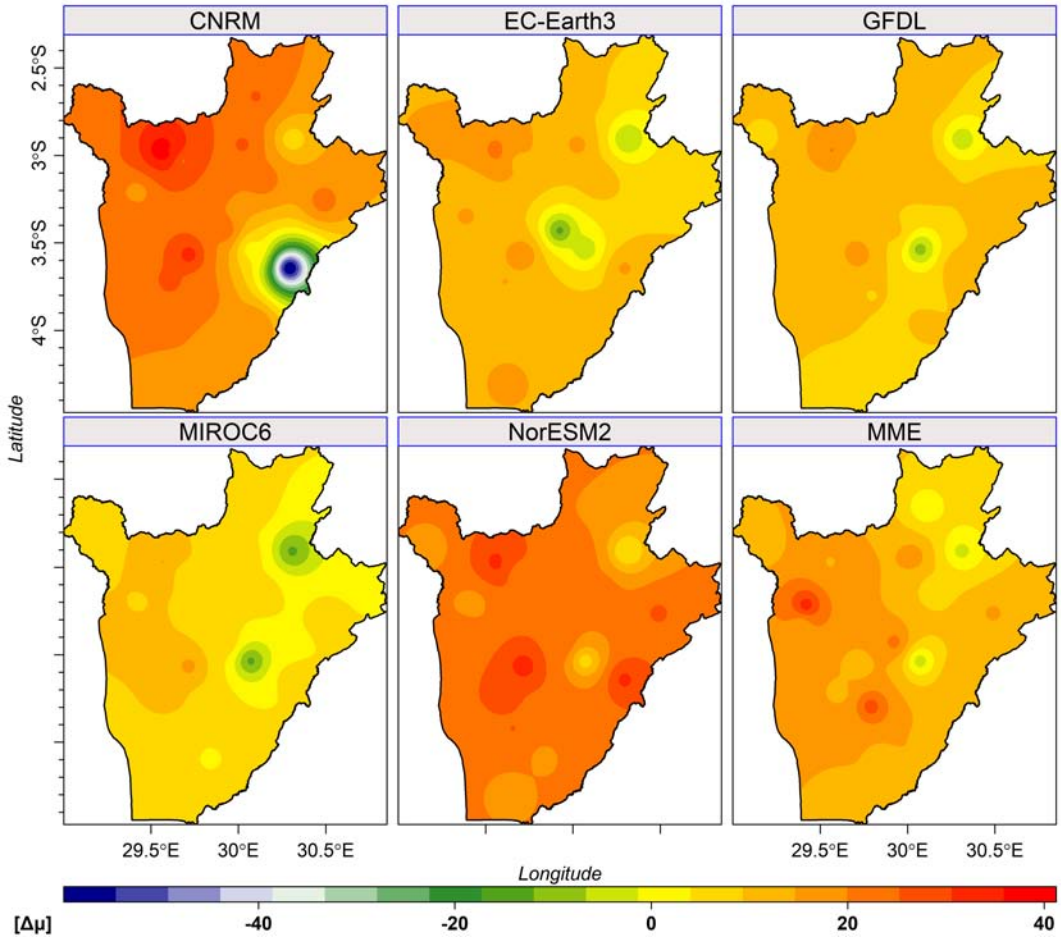



FIGURE 4.5 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx3day sur la période $2021 - 2060$

Une projection à la baisse avec des valeurs de $\Delta\mu$ variant autour de $-8$ est observée sur une petite localité au centre du pays pour le modèle EC-Earth3 et au Nord pour le modèle GFDL. En outre, pour le modèle MIROC6, nous constatons aussi que le paramètre $\mu$ est projeté à la hausse avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient entre 5 et 15. Ce modèle prédit des petits changements de $\mu$ par rapport aux autres modèles.

Enfin, pour la moyenne de l'ensemble des cinq modèles (MME), les valeurs du paramètre $\mu$ sont projetées à la hausse avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui varient entre 20 et 35 sur presque tout le pays. Nous remarquons que les changements les plus élevés se produiront au Sud de la plaine de l'Imbo Nord et sur des petites localités au centre du pays avec des valeurs de $\Delta\mu$ qui sont autour de 35. Cette tendance à la hausse du paramètre $\mu$ pour Rx5day pourra se traduire en une augmentation des extrêmes de précipitations susceptibles de causer des inondations.

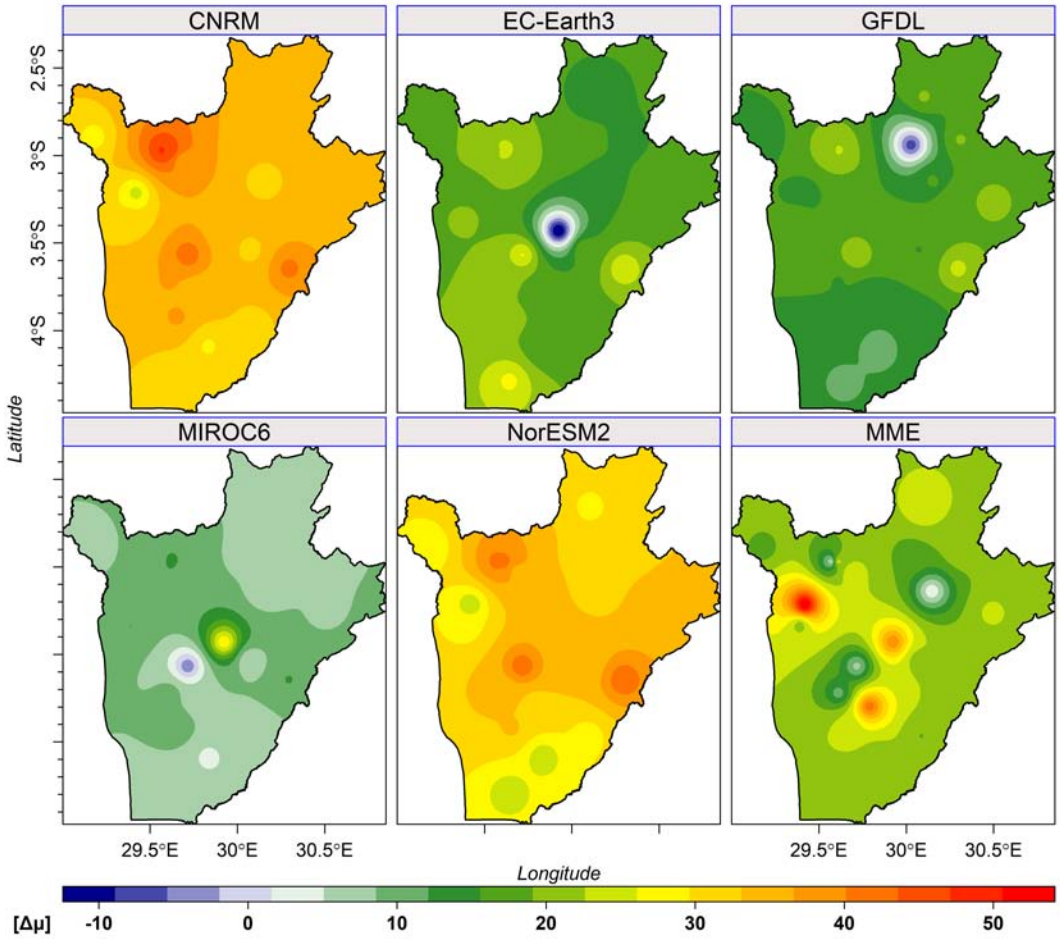



FIGURE 4.6 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour Rx5day sur la période $2021 - 2060$

#### 4.1.2.2 Les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ dans le futur proche

La figure 4.7 illustre les projections futures de la distribution spatiale des changements du paramètre $\sigma$ pour l'indice **Rx1day** sur la période $2021 - 2060$ par rapport à la période de référence $1981 - 2020$. Le paramètre $\sigma$ est projeté à la hausse sur tout le Burundi pour les modèles CNRM et NorESM2 avec des valeurs élévées de $\Delta\sigma$ variant entre 3 et 6.5. Ainsi, ces deux modèles projettent une grande variabilité des précipitations à l'Ouest pour CNRM et à l'Est pour NorESM2.

Par ailleurs, les autres modèles projettent une baisse du paramètre $\sigma$ dans la grande partie du Burundi sauf dans des petites localités à l'Est où il est prévu une légère augmentation de $\sigma$. Pour ces modèles, le constat est que les valeurs de $\Delta\sigma$ sont comprises entre $-2.5$ et 0.5 dans la plus grande partie du pays.

Pour la moyenne de l'ensemble des modèles (MME), il est projeté une légère augmentation de $\sigma$ sur une grande partie du Burundi avec des valeurs comprises entre 0 et 2. On note aussi une petite partie au Centre-Est où $\Delta\sigma$ atteindra des valeurs proches de

7.5 d'ici 2060.

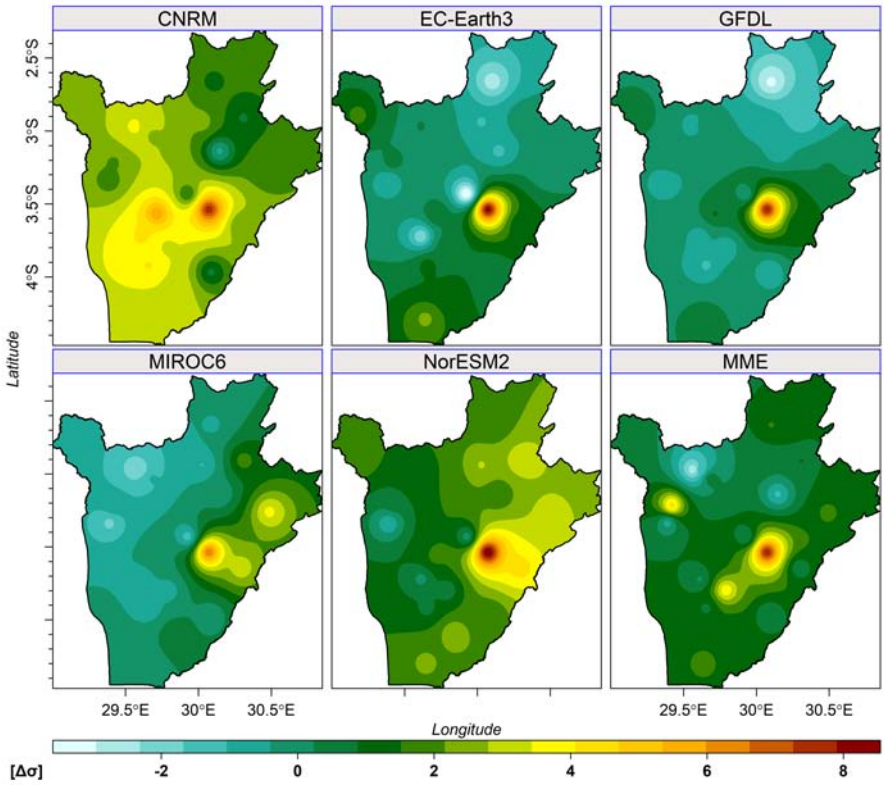



FIGURE 4.7 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx1day sur la période $2021 - 2060$

Pour l'indice $Rx3day$, la figure 4.8 montre que les valeurs de $\Delta\sigma$ sont proches de zéro pour tous les modèls sauf le modèle CNRM. Ce dernier projette dans la partie Ouest du Burundi des valeurs de $\Delta\sigma$ qui varient en moyenne autour de 20. On constate aussi que la moyenne de l'ensemble des modèles ne prévoit pas de changements remarquables de $\sigma$. En effet, ces projections révèlent qu'il n'est prévu aucun changement de la variabilité des précipitations au Burundi lié à $Rx3day$ d'ici 2060.

La figure 4.9 montre les projections du paramètre $\sigma$ pour l'indice $Rx5day$ sur la période $2021 - 2060$. Il est clair que le modèle CNRM projette les changements du paramètre d'échelle les plus élevés sur tout le pays. Pour ce modèle, nous constatons que les valeurs de $\Delta\sigma$ sont comprises entre 5.8 et 12.5. Les valeurs les plus grandes de $\Delta\sigma$ sont situées dans les régions de haute altitude et au Centre-Est. En effet, il s'en suit que ces régions seront exposées à des grandes variabilités de précipitations selon ce modèle.

Les modèles GFDL, EC-Earth3 et MIROC6 prévoient une dimunition des valeurs du paramètre d'échelle au Nord. Cela se traduira dans des précipitations moins variables par rapport à la période actuelle. Par ailleurs, le modèle EC-Earth3 projette $\sigma$ à la hausse dans le Sud avec des valeurs de $\Delta\sigma$ variant autour de 10. De même, le modèle Nor-ESM2

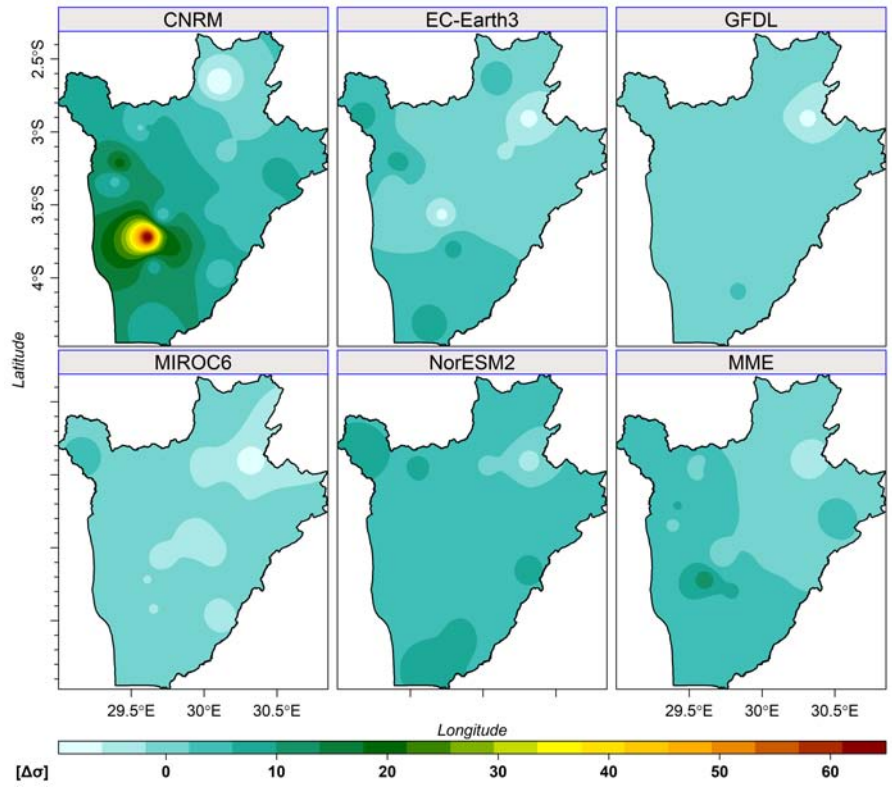



FIGURE 4.8 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx3day sur la période $2021 - 2060$

prévoit une augmentation du paramètre $\sigma$. Pour ce modèle, les valeurs les plus élévées de $\Delta\sigma$ sont situées à l'Ouest et varient autour de 6.

Pour la moyenne de l'ensemble des cinq modèles, il est prévu une baisse de la variabilité des précipitations au Nord du Burundi où $\Delta\sigma$ varie autour de $-5$. Par ailleurs, le paramètre $\sigma$ est projeté à la hausse dans les autres régions avec $\Delta\sigma$ variant entre 2.5 et 6.5. Cela se traduira ainsi en une variabilité intense des précipitations d'ici 2060.

#### 4.1.2.3 Les changements du paramètre de forme $\xi$ dans le futur proche

La figure 4.10 indique les changements du paramètre de forme $\xi$ sur la période $2021 - 2060$ pour $Rx1day$. Nous remarquons que trois modèles EC-Earth3, NorESM2 et MIROC6 présentent des valeurs qui varient autour de zéro sur la grande partie du Burundi. Ainsi, ces trois modèles ne projettent aucun changement de la forme de la distribution des précipitations. Néanmoins, des valeurs positives de $\Delta\xi$ s'observent au Nord pour les modèles EC-Earth3 et MIROC6 avec des valeurs qui varient autour de 0.2.

Notons que les valeurs les plus élevées de $\Delta\xi$ tournent autour de 0.4. Ces valeurs sont projetées au Nord pour les modèles CNRM, EC-Earth3 et GFDL. Ce dernier les prévoit aussi au Sud. Fort est de constater que les modèles GFDL et CNRM projettent

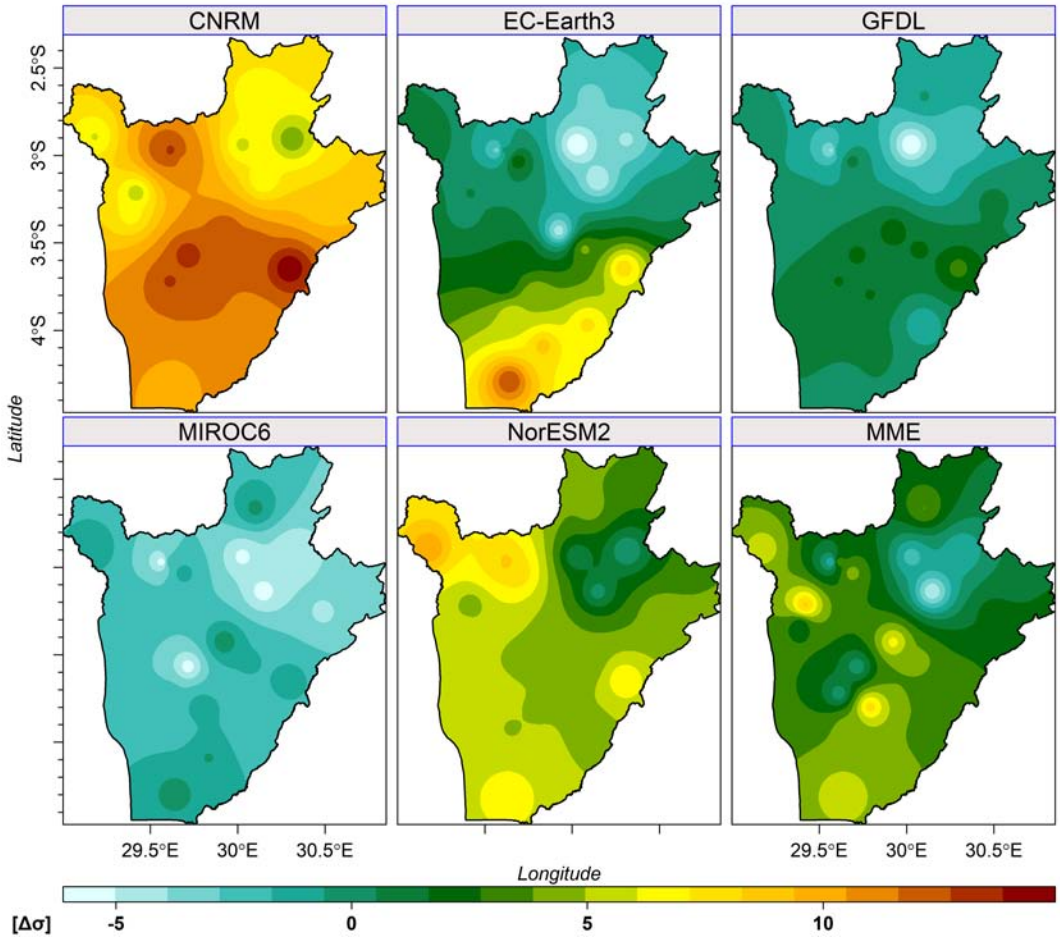



FIGURE 4.9 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour Rx5day sur la période $2021-2060$

une distribution des précipitations avec une queue lourde sur une grande partie du pays. Cela s'exprime par les valeurs positives de $\Delta\xi$ prévues dans plusieurs régions du Burundi d'ici 2060.

Pour la moyenne de l'ensemble des cinq modèles (MME), le constat est que les valeurs positives de $\Delta\xi$ varient dans l'intervalle de $[0.12, 0.23]$ au Nord. Par ailleurs, les valeurs de $\Delta\xi$ sont presque nulles au Sud de la plaine de l'Imbo Nord, à l'Est et au Sud du Burundi.

La figure 4.11 montre les changements projetés du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice $Rx3day$ sur la période $2021-2060$. Les valeurs négatives de $\Delta\xi$ sont prévues au Nord et à l'Ouest pour les modèle EC-Earth3 et CNRM, respectivement. On note également que les modèles MIROC6 et NorESM2 projettent $\xi$ à la baisse sur la grande partie du Burundi. Les valeurs négatives de $\Delta\xi$ les plus élévées sont projetées par MIROC6 au Nord-Ouest et varient autour de $-0.3$. La baisse de $\xi$ projetée exprime qu'on s'attend à un rétrécissement de la queue de la distribution des précipitations extrêmes liées à $Rx3day$. Par

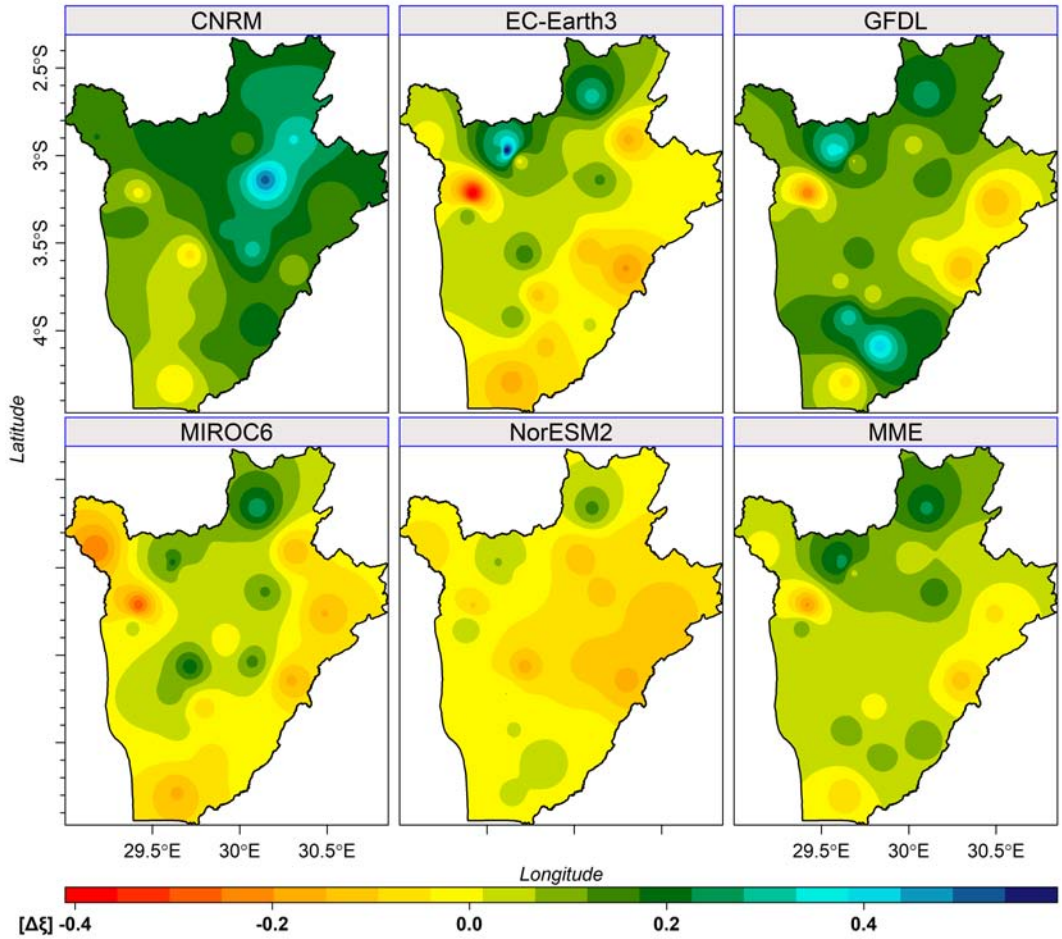



FIGURE 4.10 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx1day sur la période $2021-2060$

ailleurs, on remarque que pour les modèles EC-Earth3 et GFDL, les tendances à la hausse de $\xi$ dominent au Centre-Ouest, à l'Est et au Sud avec des valeurs tournant autour de 0.25.

La moyenne de l'ensemble de tous les modèles (MME) projette des valeurs de $\Delta\xi$ qui tournent autour de zéro. Les valeurs légèrement inférieures à zéro sont prévues à l'Ouest (la plaine de l'Imbo Nord), au Nord-Est et sur une partie du Sud-Est. Par contre, sur les autres partie du pays, le MME projette des changements de $\xi$ avec des valeurs légèrement supérieure à zéro. Ainsi, le MME ne prédit aucun changement remarquable de la forme de la distribution des précipitations extrêmes relatives à $Rx3day$.

La figure 4.12 illustre les changements projetés du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice $Rx5day$ sur la période $2021-2060$. On constate que les changements de $\xi$ sont projetés à la baisse par les modèles CNRM et MIROC6 sur la grande partie du Burundi. Le rétrécissement de la queue de la distribution des précipitations extrêmes liées à $Rx5day$ est aussi projeté par le modèle GFDL. D'autre part, les modèles EC-Earth3, GFDL et NorESM2 prévoient des valeurs de $\Delta\xi$ plus grandes au Sud par rapport aux autres mo-

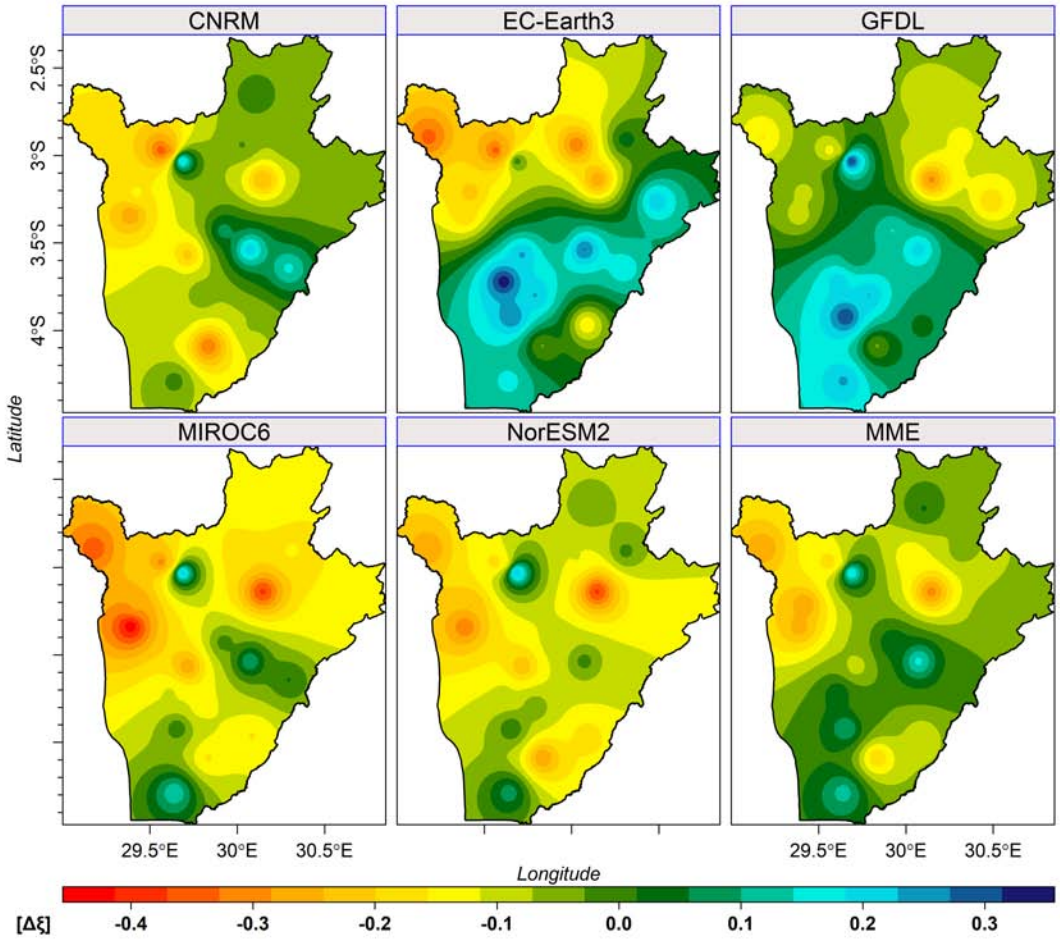



FIGURE 4.11 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx3day sur la période 2021 – 2060

dèles avec des valeurs de $\Delta\xi$ variant autour de 0.28 . Notons aussi que ces trois modèles prédisent un l'eger rallongement de la queue de la distribution des précipitations avec des valeurs de $\Delta\xi$ comprises entre 0 et 0.1.

De même, la moyenne de l'ensemble de tous les modèles (MME) prévoit un rallongement de la queue de la distribution des précipitations sur la grande partie du Burundi. Les valeurs de $\Delta\xi$ varient dans l'intervalle $[0, 0.22]$. Les valeurs négatives de $\Delta\xi$ sont prédites dans la plaine de l'Imbo Nord et sont proches de zéro.

Pour tous les indices, les changements du paramètre $\xi$ pour tous les modèles montrent que, dans toutes les régions du Burundi, les valeurs de $\Delta\xi$ sont inférieures à 0.5 et tournent autour de zéro. Par conséquent, la forme de la distribution des précipitations extrêmes projetées ne sera pas à queue dominante. Cela révèle que le Burundi ne sera pas à l'abri des précipitations extrêmes.

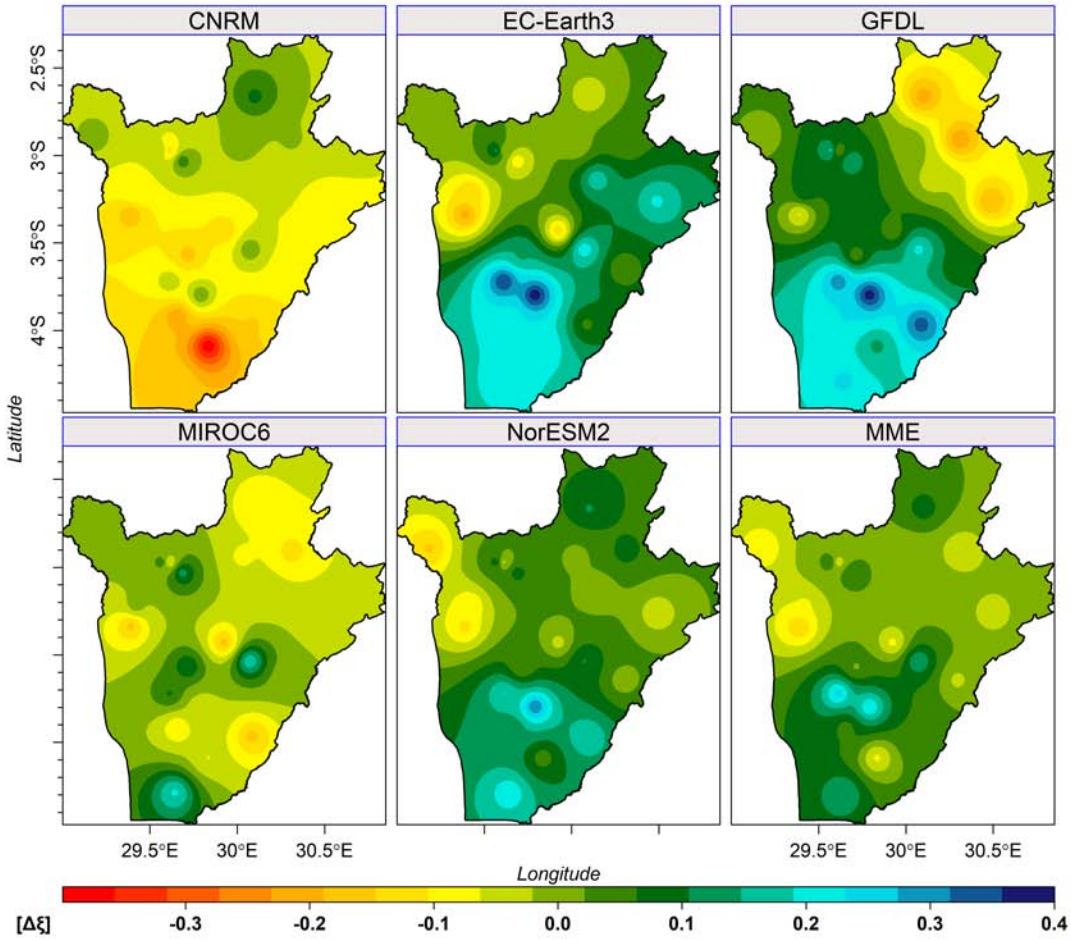



FIGURE 4.12 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour Rx5day sur la période 2021 – 2060

### 4.1.3 Projection des changements futurs des extrêmes de précipitations sur la période 2061-2100

#### 4.1.3.1 Les changements du paramètre de position $\mu$ dans le futur lointain

La figure 4.13 montre les changements du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx1day sur la période 2061-2100. Comme la figure le montre, à part une petite partie au centre pour le modèle MIROC6 qui présente une valeur de $\Delta\mu$ négative, tous les modèles s'accordent sur l'augmentation du paramètre $\mu$.

Le modèle CNRM se distingue des autres avec des valeurs de $\Delta\mu$ plus grandes surtout dans la partie Ouest de la plaine de l'Imbo et la crête Congo-Nil où $\Delta\mu$ atteint la valeur 16.5. Il en est de même pour la moyenne de l'ensemble de tous les modèles. Donc, nous comprenons par là que l'intensité des précipitations extrêmes relatives à $Rx1day$ augmentera dans toutes les régions du pays.

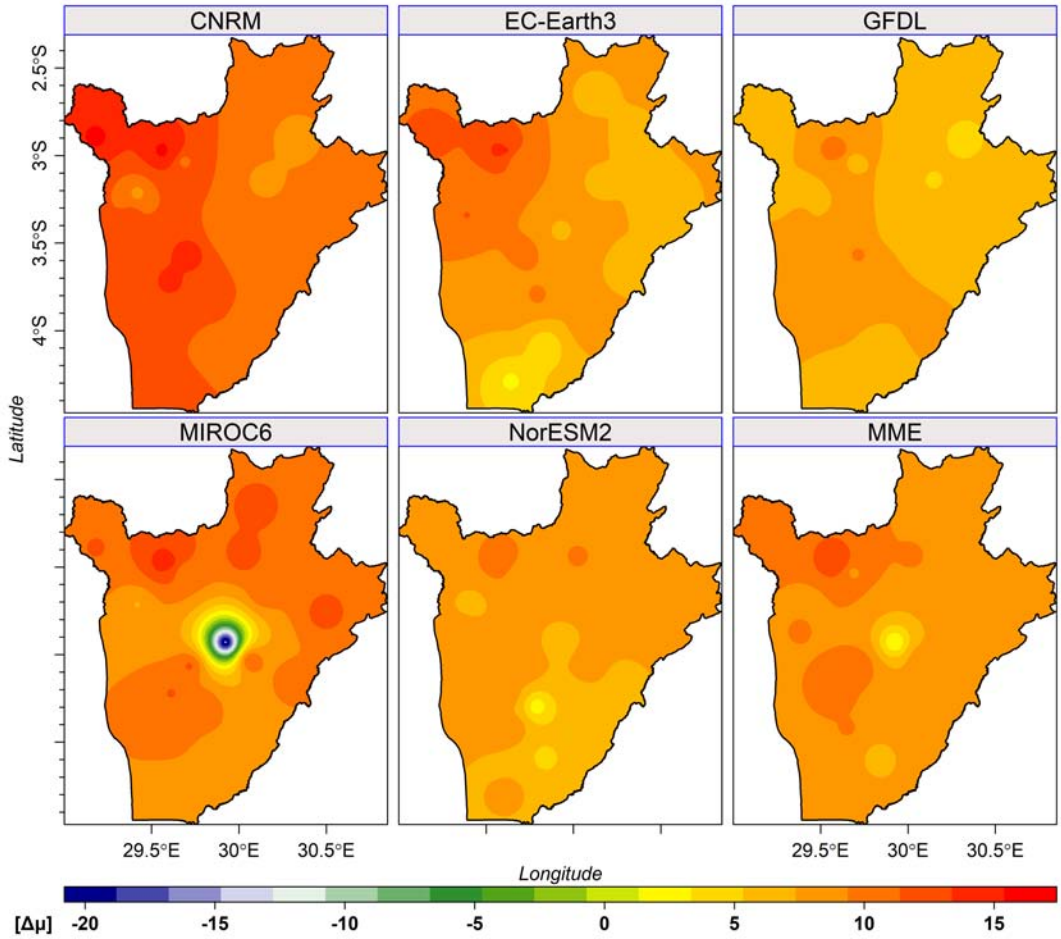



FIGURE 4.13 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx1day (2061-2100)

Pour l'indice Rx3day (Figure 4.14), le paramètre $\mu$ est projeté à la hausse par tous les modèles. Les valeurs les plus élévées de $\Delta\mu$ tournent autour de 40 et sont projetées par CNRM et NorESM2 au Nord et sur une petite partie au Centre.

Il est prévu une tendance à la baisse des valeurs du paramètre $\mu$ pour les modèles MIROC6 (à l'Est, au centre et au Sud-Est), EC-Earth3 (à l'Est et au Nord-Est) et GFDL (à l'Est, au centre-Est et au Sud). Partout au Nord, le paramètre de position connaîtra des valeurs plus élevées par rapport à d'autres localités.

Pour la moyenne de l'ensemble de tous les modèles (MME), il est prévu une augmentation du paramètre $\mu$ dans tout le pays. Les valeurs de $\Delta\mu$ les plus élevées tournent autour de 30. Elles sont projetées au Nord et dans les régions de haute altitude (Gisozi). Sur la plus grande partie du Burundi, les changements projetés de $\mu$ sont comprises entre 14.5 et 24.5.

La figure 4.15 illustre les changements du paramètre de position pour l'indice Rx5day. En effet, le paramètre $\mu$ est projeté à la hausse par tous les modèles dans toutes

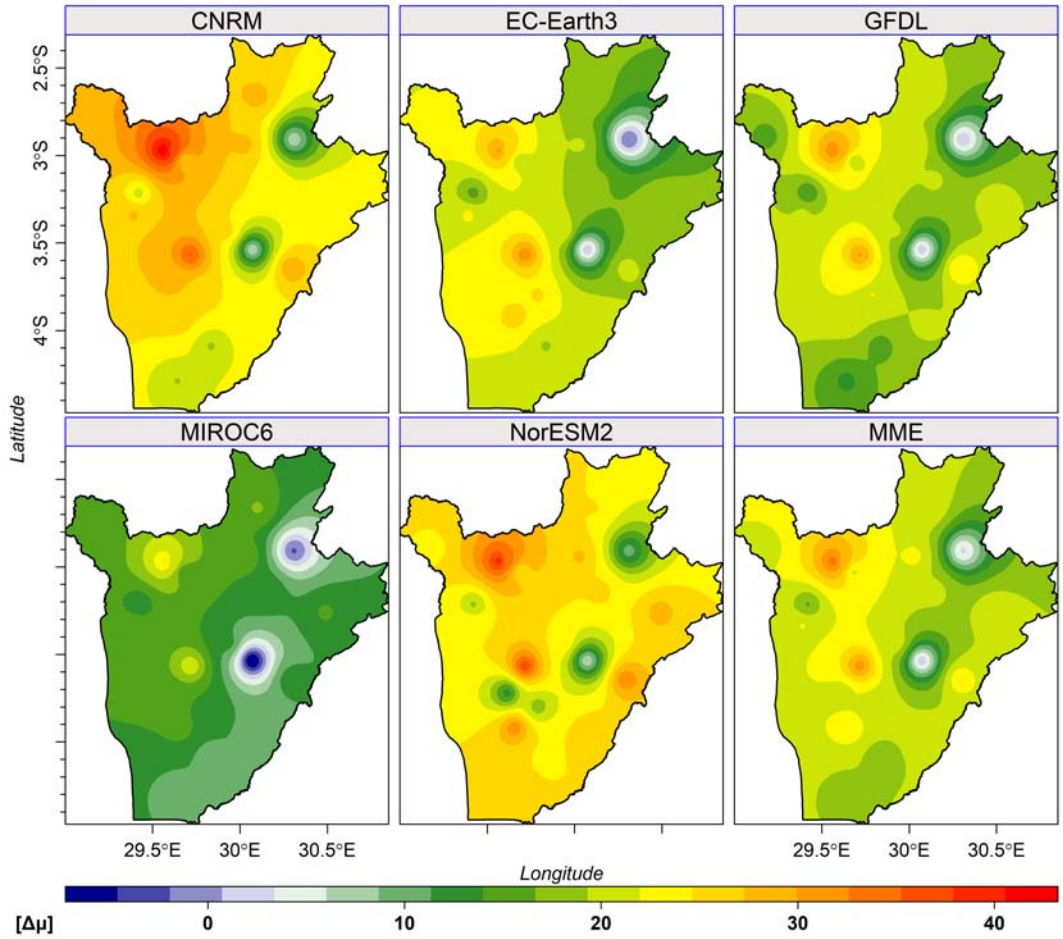



FIGURE 4.14 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx3day (2061-2100)

les régions. Les résultats montrent que CNRM et NorESM2 prévoient des changements les plus élévés par rapport aux autres modèles sur la grande partie du Burundi. Les valeurs de $\Delta\mu$ varient entre 24 et 40 excepté une partie au Sud pour le modèle CNRM où $\Delta\mu = 17$. Par ailleurs, le modèle MIROC6 prévoit au Nord-Est et sur une partie du Centre-Est des valeurs de $\Delta\mu$ inférieures à 13.

Pour les modèles EC-Earth3 et GFDL, les projections futures de la distribution spatiale de $\Delta\mu$ sont diamétralement opposées sauf au Centre-Nord. En effet, les valeurs les plus élévées de $\Delta\mu$ sont prévues au Centre-Ouest pour EC-Earth3 contrairement à GFDL qui projette des grands changements positifs de $\mu$ au Centre-Est.

Quant à MME, les valeurs du paramètre $\mu$ sont projetées à la hausse sur tout le Burundi. Les changements les plus élevés sont prévus au Nord et sur une partie de la Crête Congo-Nil avec des valeurs de $\Delta\mu$ variant entre 24 et 35. Il s'en suit donc que l'augmentation prévue du paramètre $\mu$ pour l'indice $Rx5day$ se traduira en une augmentation de l'intensité des extrêmes de précipitations sur la période $2061 - 2100$.

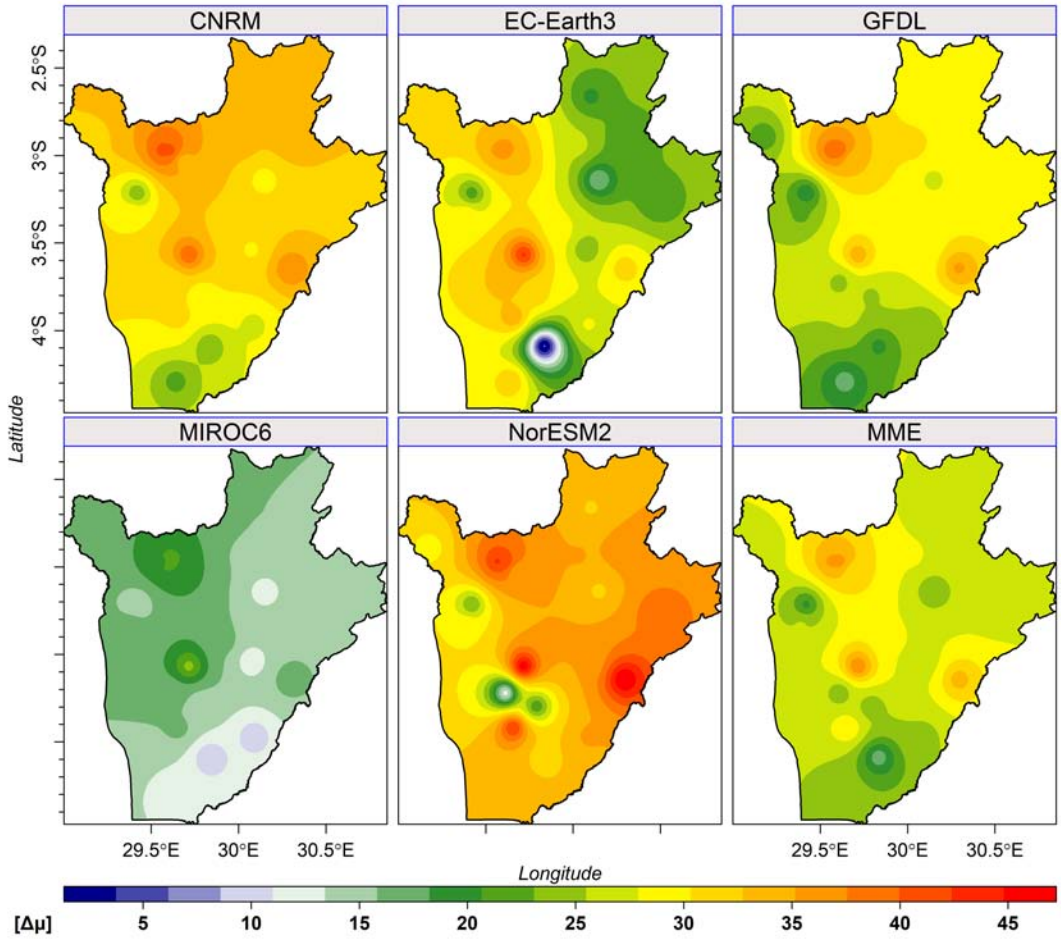



FIGURE 4.15 – Changement du paramètre de position $\mu$ pour l'indice Rx5day (2061-2100)

#### 4.1.3.2 Les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ dans le futur lointain

La figure 4.16 indique les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx1day sur la période 2061-2100. Des tendances à la hausse les plus élévées sont prévues à l'Est pour les modèles CNRM et MIROC6 ainsi que pour les modèles EC-Earth3 (centre, Nord-Ouest) et NorESM2 (Sud, centre).

Les modèles CNRM, EC-Earth3, MIROC6 et NorESM2 prévoient des valeurs de $\Delta\sigma$ comprises entre 2 et 5 sur une grande partie du Burundi. Par ailleurs, le modèle GFDL projette des valeurs de $\Delta\sigma$ les moins élévées (proches de zéro) par rapport aux autres modèles sur une grande partie du pays.

En fin, la MME montre que le paramètre d'échelle est projeté à la hausse sur tout le pays. Sur une grande partie du Burundi, MME prévoit des valeurs de $\Delta\sigma$ comprises entre 2.5 et 4. Il s'en suit donc que le Burundi connaîtra une augmentation de la variabilité des précipitations extrêmes relatives à l'indice $Rx1day$ sur la période 2061-2100.

La figure 4.17 montre les changements du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice

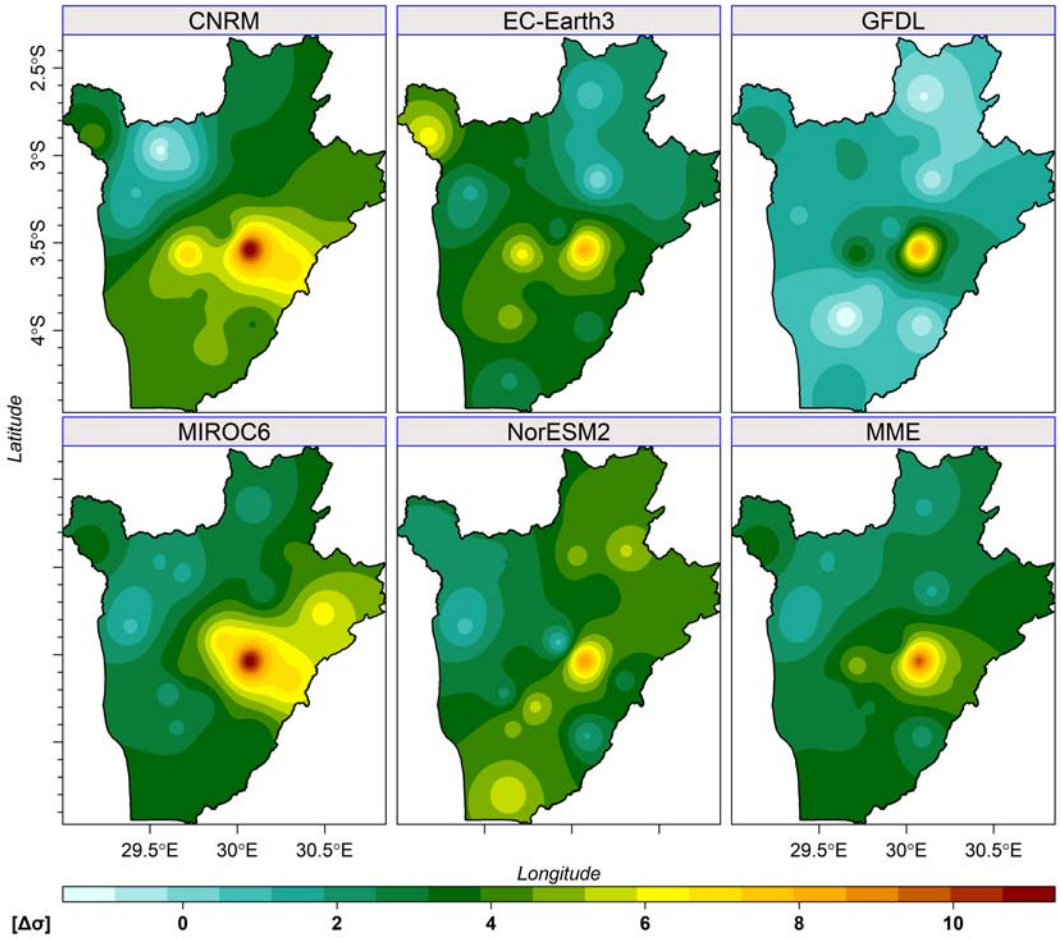



FIGURE 4.16 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx1day (2061-2100)

$Rx3day$ sur la période $2061-2100$. Ainsi, les modèles EC-Earth3 et NorESM2 prévoient les valeurs de $\Delta\sigma$ les plus élévées dans le Sud et au Nord-Ouest du pays. Ces valeurs les plus élévées $\Delta\sigma$ sont au voisinage de 13. De plus, tous les modèles montrent que le paramètre $\sigma$ connaîtra une augmentation dans la plupart des régions avec des valeurs de $\Delta\sigma$ comprises entre 2.5 et 7.5. Il est évident que ces régions seront confrontées à une grande variabilité de précipitations extrêmes.

Par ailleurs, au Nord-Est (Muyinga), presque tous les modèles y compris la MME projettent une baisse ou ne projettent aucun changement de $\sigma$. Cela suggère que dans cette région, la variabilité de précipitations extrêmes sera moins importante sur la période $2061-2100$.

L'analyse de la MME montre qu' à part le Nord-Est, les autres régions connaîtront une augmentation de $\sigma$ avec des valeurs de $\Delta\sigma$ comprises entre 4 et 7.

La figure 4.18 est illustre les variations du paramètre $\sigma$ pour l'indice Rx5day. Les résultats nous font constater que, d'une part, le paramètre $\sigma$ est projeté à la baisse au

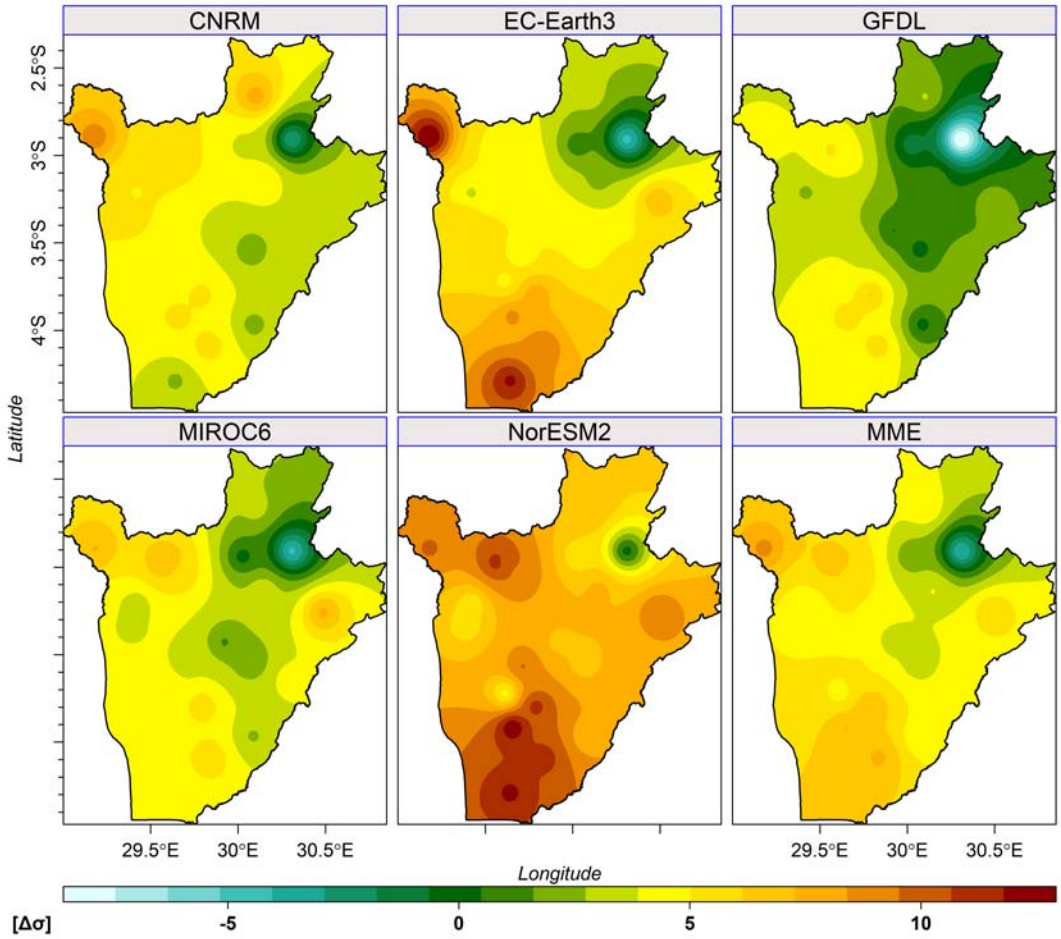



FIGURE 4.17 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx3day (2061-2100)

Nord-Est (Muyinga, Kirundo) et au Sud avec des valeurs de $\Delta\sigma$ qui varient autour de 0 pour les modèles EC-Earth3, GFDL et MIROC6. La diminution est grande au Sud pour le modèle EC-Earth ($\Delta\sigma = -10$) et au Nord-Est (Muyinga) avec des valeurs de $\Delta\mu$ proche de $-5$ pour le modèle GFDL.

D'autre part, les projections futures prévoient une augmentation du paramètre $\sigma$ dans plusieurs régions du Burundi pour les modèles CNRM, EC-Earth3 et NorESM2. Au Nord-Ouest (modèle EC-Earth3), au Sud et à l'Est (modèle NorESM2), il est prévu des valeurs de $\Delta\sigma$ les plus élévées qui sont proches de 15.

La MME, quant à elle, montre que, à l'exception de la partie Nord-Est (Muyinga) et une petite partie au Sud où $\Delta\sigma$ est proche de 0, les projections prévoient une augmentation du paramètre $\sigma$. Sur une grande partie du Burundi $\Delta\sigma$ varie entre 4 et 7.5. Ainsi, une augmentation de la variabilité des précipitations extrêmes relatives à l'indice $Rx5day$ sera enregistrée dans la plupart des régions du Burundi sur la période $2061 - 2100$.

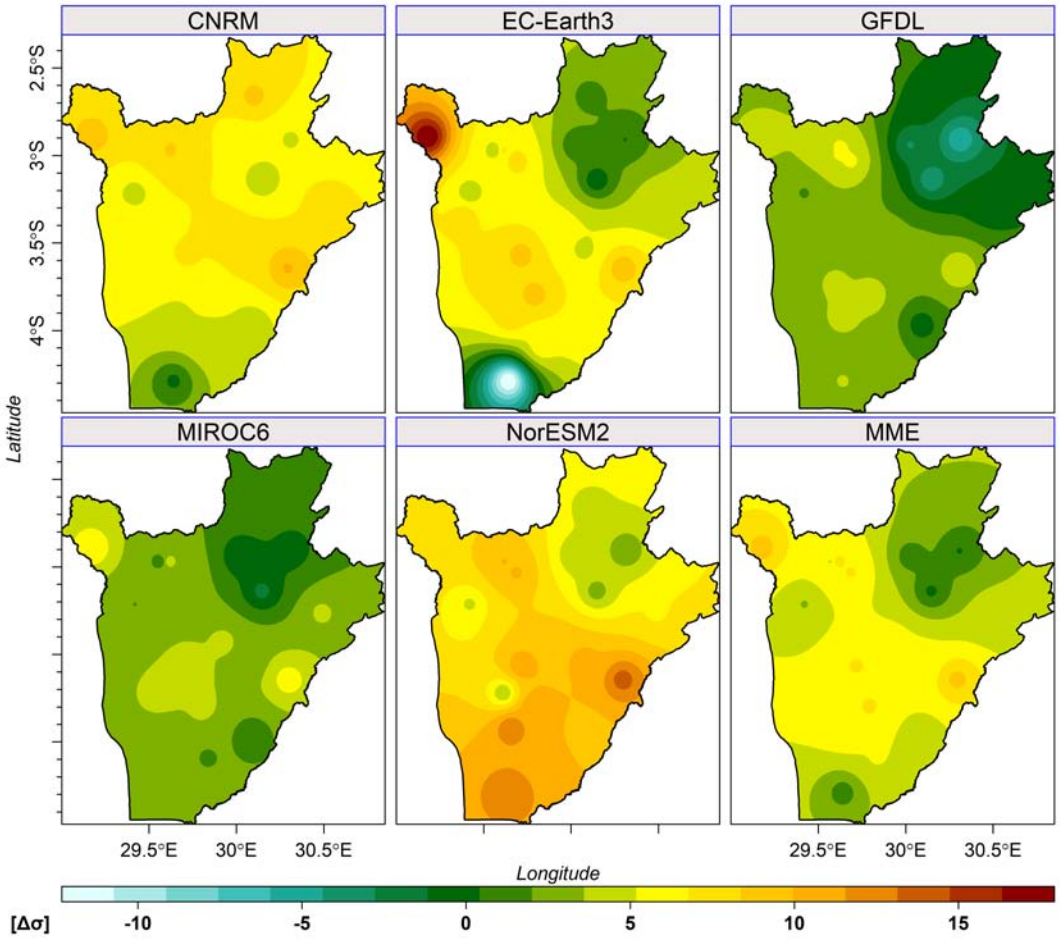



FIGURE 4.18 – Changement du paramètre d'échelle $\sigma$ pour l'indice Rx5day (2061-2100)

#### 4.1.3.3 Les changements du paramètre de forme $\xi$ dans le futur lointain

La figure 4.19 indique les changements du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx1day sur la période $2061 - 2100$. Il est prévu une augmentation de $\xi$ avec des valeurs de $\Delta\xi$ variant entre 0.25 et 0.37. Ces valeurs sont projetées par les modèles CNRM (Nord), GFDL (Sud), NorESM2 (sauf une partie au Sud et au Nord-Est) et MIROC6 (une partie au Nord). La plus grande valeur de $\Delta\xi$ est attendu au Nord (Ngozi, Kayanza) pour le modèle CNRM ($\Delta\xi \simeq 0.47$). Cela explique qu'il est prévu une distribution à queue épaisse dans ces régions.

Par contre, $\Delta\xi$ est négative pour les modèles GFDL (Nord, Est), CNRM (Sud) et MIROC6 (centre, Est). Cela signifie qu'on s'attend à une distribution à queue courte dans ces régions. Pour EC-Earth3, la grande partie du pays ne connaîtra pas de changement de la forme de la distribution ($\Delta\xi \simeq 0.0$).

La MME quant à elle prévoit une augmentation de $\xi$ sur presque toutes les régions du Burundi. Cela se traduira en un allongement de la queue de la distribution des pré-

cipitations extrêmes. Dans des petites localités à l'Est et au Sud, les valeurs de $\Delta\xi$ sont très proches de 0.

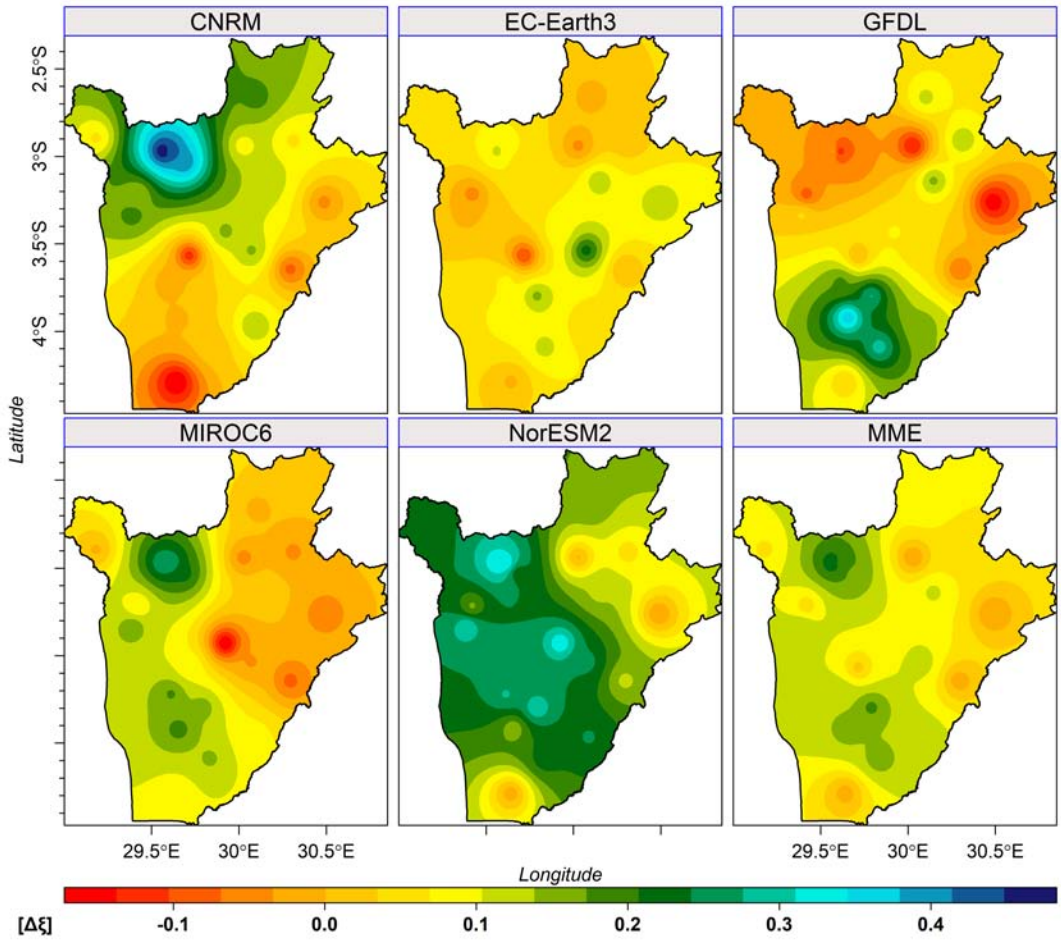



FIGURE 4.19 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx1day (2061-2100)

Pour l'indice Rx3day (Figure 4.20), la distribution spatiale de $\Delta\xi$ ne sera pas uniforme sur le Burundi. Les valeurs négatives de $\Delta\xi$ sont projetées par les modèles EC-Earth3 (Nord-Est et Nord-Ouest), CNRM (Nord-Ouest), MIROC6 (Nord et Nord-Ouest), NorESM2 (Nord-Est, Nord-Ouest et Sud-Est) et GFDL (sur presque tout le pays). On remarque que presque tous les modèles sauf MIROC6 projettent des valeurs de $\Delta\xi$ proches de zéro sur une grande partie du Burundi.

En effet, les valeurs de $\Delta\xi$ les plus élevées sont projetées au Sud (Makamba) et à l'Est (Ruyigi) par le modèle MIROC6 où $\Delta\xi$ est proche de 0.4. Pour la MME, les valeurs de $\Delta\xi$ sont positives au Sud et à l'Est avec des valeurs comprises entre 0.01 et 0.23. Les valeurs négatives sont attendues au Nord, au Nord-Ouest et au Nord-Est (Kirundo). Ainsi, ces résultats expriment qu'il est prévu une distribution à queue courte des précipitations extrêmes relatives à $Rx3day$.

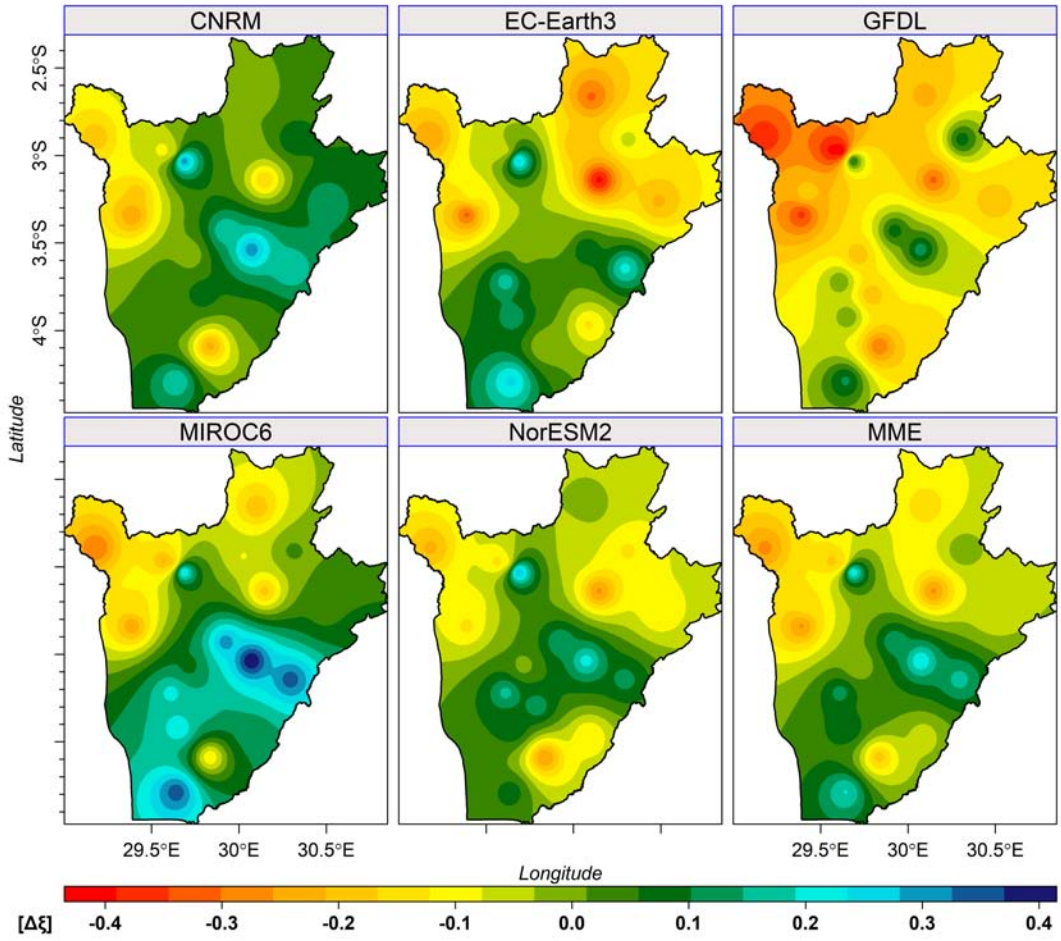



FIGURE 4.20 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx3day (2061-2100)

La figure 4.21 indique les changements du paramètre $\xi$ pour l'indice Rx5day. Le paramètre $\xi$ est projeté à la hausse sur une grande partie du pays par la plupart des modèles sauf GFDL. Ce dernier prévoit une tendance à la baisse pour $\xi$ avec des valeurs de $\Delta\xi$ les plus basses ($\Delta\xi \simeq -0.5$) au Nord-Ouest. Par ailleurs les valeurs de $\Delta\xi$ les plus élévées sont projetées sur une grande partie au Sud et Sud-Est par le modèle MIROC6 avec des valeurs comprises entre 0.3 et 0.45.

La MME prévoit une tendance à la hausse de $\xi$ avec des valeurs de $\Delta\xi$ comprises entre 0.0 et 0.2 sur presque tout le pays. Il s'en suit que sur la grande partie du Burundi, on connaîtra une distribution des précipitations extrêmes à queue lourde. On note également des localités du Nord-Ouest et du Nord-Est qui connaîtront une légère baisse de $\xi$ avec des valeurs de $\Delta\xi$ proches de zéro.

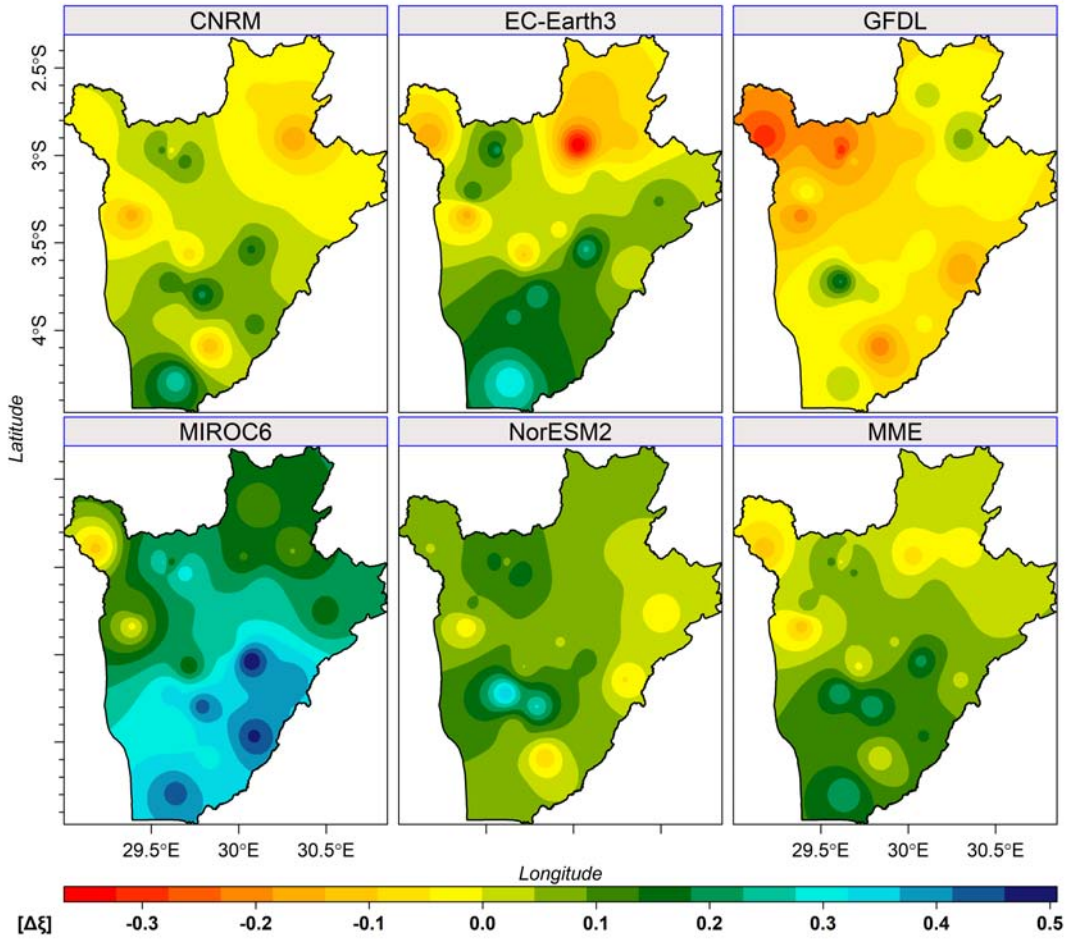



FIGURE 4.21 – Changement du paramètre de forme $\xi$ pour l'indice Rx5day (2061-2100)

### 4.1.4 Changements futurs de la probabilité des extrêmes de précipitations

Rappelons que pour quantifier le changement de la probabilité d'un événement climatique extrême, nous avons utilisé le rapport de risque entre les périodes futures et la période de référence. Ainsi, le tableau 4.1 indique les rapports de risque ($RR$) d'inondation ($90^{\text{ème}}$ percentile) sur tout le Burundi pour chaque indice de précipitations extrêmes et pour chaque modèle projetés sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$ suivant le scenario $SSP5-8.5$.

Sur la période $2021-2060$, le modèle CNRM prédit une légère diminution du risque d'inondation pour Rx1day et Rx5day avec des valeurs de $RR$ égalent à 0.93 et 0.96, respectivement. Par contre, CNRM projette une légère augmentation du risque d'inondation lié à Rx3day avec un $RR$ égale à 1.02. Pour le modèle EC-Earth3, il est prévu une diminution du risque d'inondation pour Rx3day et Rx5day avec des valeurs respectives de $RR$ égalent à 0.94 et 0.93. Par ailleurs, EC-Earth3 ne prédit aucun changement pour l'indice Rx1day ($RR = 1.00$).

Pour le modèle GFDL, il est projeté une augmenation du risque d'inondation pour tous les indices Rx1day, Rx3day et Rx5day avec des valeurs de $RR$ égalent à 1.17, 1.18 et 1.14, respectivement.
Le modèle, MIROC6 quant à lui, prédit une augmentation du risque d'inondation pour tous les trois indices avec une valeur très élévée de $RR$ égale à 1.55 pour Rx3day.
Pour le modèle NorESM2, il est prévu une légère augmenation du risque d'inondation pour Rx1day et Rx3day avec des valeurs de $RR$ égalent à 1.08 et 1.06, respectivement. Par contre, il projette une diminution du risque d'inondation lié à Rx5day avec $RR = 0.91$.

Pour la MME, il est projeté une augmenation du risque d'inondation pour Rx3day et une légère augmenation du risque d'inondation pour Rx1day avec des valeurs respectives de $RR$ égalent à 1.15 et 1.08. Pour l'indice Rx5day, la Moyenne de l'Ensemble des 5 Modèles (MME) ne prédit aucun changement ($RR \simeq 1.00$) sur l'ensemble du Burundi.

Sur la période $2061 - 2100$, le modèle CNRM prédit une augmentation du risque d'inondation pour Rx3day $RR = 1.10$ et une légère augmenation du risque d'inondation pour Rx1day et Rx5day avec $RR = 1.03$.
Pour le modèle EC-Earth3, il est projeté une diminution du risque d'inondation pour Rx3day et Rx5day avec des valeurs de $RR$ égalent à 0.84 et 0.76, respectivement. Par contre, EC-Earth3 prévoit une augmenation du risque d'inondation pour Rx1day avec $RR = 1.08$.
Pour le modèle GFDL, il est prévu une augmenation du risque d'inondation lié aux indices Rx1day et Rx5day avec des valeurs de $RR$ égalent à 1.05 et 1.08, respectivement. Par ailleurs, GFDL projette une diminution du risque d'inondation pour Rx3day avec $RR = 0.83$
Pour le modèle MIROC6, la prédiction montre une dimunition du risque d'inondation pour les indices Rx3day et Rx5day avec les valeurs de $RR$ égalent à 0.80 et 0.90, respectivement. Par ailleurs, aucun changement ($RR \simeq 1.00$) n'est prévu pour Rx1day.
Quant au modèle NorESM2, il est projeté une augmenation du risque d'inondation pour Rx1day et Rx3day avec des valeurs de $RR$ égalent à 1.08 et 1.34, respectivement. Par contre, il est prévu une diminution du risque d'inondation lié à Rx5day avec $RR = 0.79$.

La Moyenne de l'Ensemble des 5 Modèles (MME) quant à elle prédit une augmenation du risque d'inondation pour Rx1day ($RR = 1.05$) et une diminution du risque d'inondation pour Rx3day ($RR = 0.98$) et Rx5day ($RR = 0.91$) sur l'ensemble du Burundi. Notons que ces valeurs projetées par MME sont proches de 1.

TABLE 4.1 – Les rapports de risque (RR) d'inondation sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$.

| Modèle | Indice | Rapport de risque | |
|---|---|---|---|
| | | **2021-2060** | **2061-2100** |
| CNRM | Rx1day | 0.93 | 1.03 |
| | Rx3day | 1.02 | 1.10 |
| | Rx5day | 0.96 | 1.03 |
| EC-Earth3 | Rx1day | 1.00 | 1.08 |
| | Rx3day | 0.94 | 0.84 |
| | Rx5day | 0.93 | 0.76 |
| GFDL | Rx1day | 1.17 | 1.05 |
| | Rx3day | 1.18 | 0.83 |
| | Rx5day | 1.14 | 1.08 |
| MIROC6 | Rx1day | 1.21 | 1.01 |
| | Rx3day | 1.55 | 0.80 |
| | Rx5day | 1.12 | 0.90 |
| NorESM2 | Rx1day | 1.08 | 1.08 |
| | Rx3day | 1.06 | 1.34 |
| | Rx5day | 0.91 | 0.79 |
| MME | Rx1day | 1.08 | **1.05** |
| | Rx3day | **1.15** | 0.98 |
| | Rx5day | 1.01 | 0.91 |

### 4.1.5 Prédiction de la distribution spatiale des changements de la probabilité des extrêmes de précipitations

#### 4.1.5.1 Distribution spatiale de $RR$ sur la période 2021-2060

La figure 4.22 indique la distribution spatiale des changements de risques d'inondation (RR) relatifs à Rx1day sur la période $2021-2060$. Les modèles MIROC6, GDFL et NorESM2 prédisent une augmentation de risque d'inondation ($RR > 1$) sur une grande partie du Burundi. D'autre part, les modèles CNRM et EC-Earth3 ne projettent aucun changement de risque d'inondation ($RR \simeq 1$) sur plusieurs régions du pays. Le modèle MIROC6 prédit que les inondations se produiront à l'Est (Ruyigi) avec une très grande probabilité ($RR > 5$) par rapport aux autres régions. Par ailleurs, une réduction de risque d'inondation ($RR < 1$)est prévue par CNRM au Nord (région de Rwegura) et EC-Earth3 (Centre).

Pour la MME, il n'est prévu aucun changement de risque d'inondation ($RR \simeq 1$) dans les régions Nord (Kirundo, Ngozi, Kayanza), Ouest (Cibitoke), Centre et Est (Cankuzo) du pays. Par ailleurs, une grande partie de régions sera exposée à un grand risque d'inondation ($RR > 1$) par rapport à la période de référence.

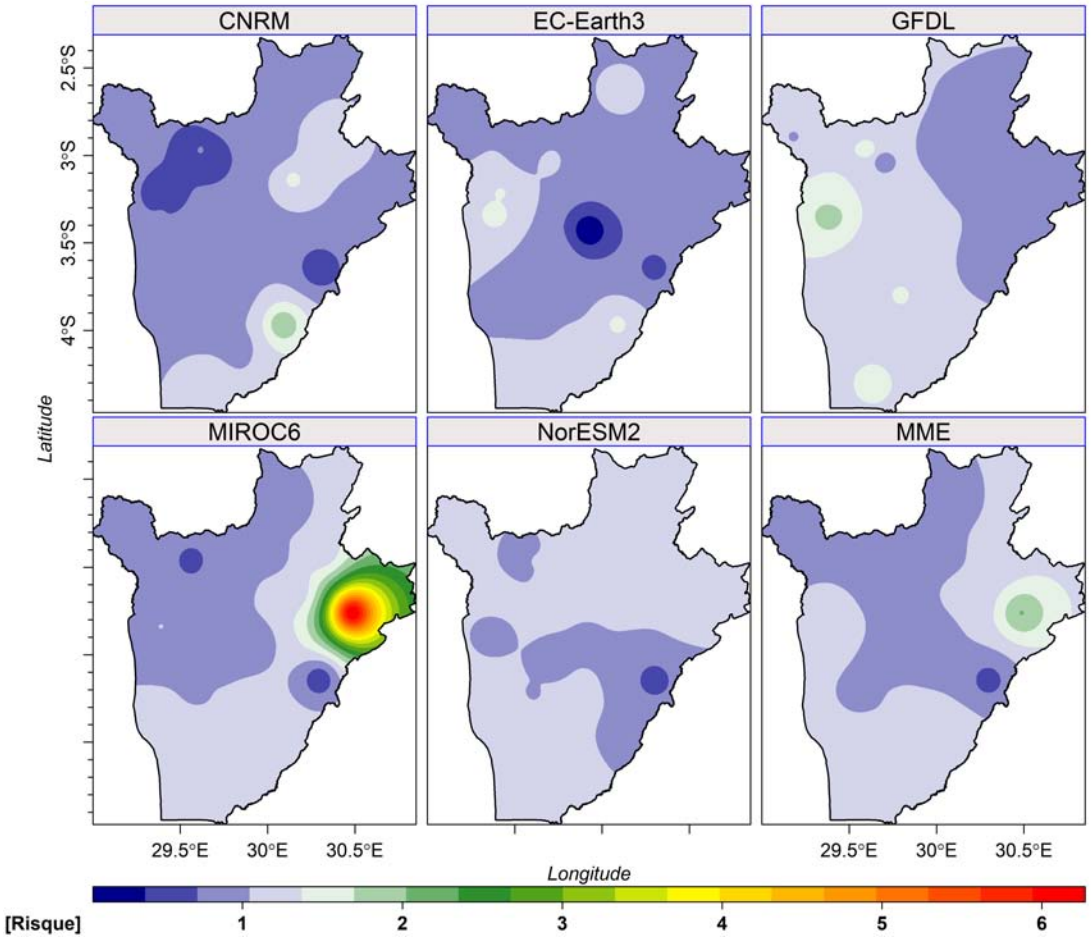



FIGURE 4.22 – Rapport de risque pour l'indice $Rx1day$ (2021-2060)

Pour l'indice $Rx3day$ (Figure 4.23), les modèles CNRM, EC-Earth3 et NorESM2 ne projettent aucun changement de risque d'inondation ($RR \simeq 1$) sur une grande partie du Burundi. Par contre, le modèle MIROC6 prévoit une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) sur une grande partie du pays. Le plus grand risque d'inondation est projeté au Nord par MIROC6 avec $RR > 10$. D'autre part, le modèle CNRM prédit une diminution du risque d'inondation sur une grande partie du Nord-Est avec un $RR < 1$. On note aussi qu'il est prévu une réduction de la probabilité du risque d'inondation ($RR < 1$) sur quelques localités du Nord-Est pour EC-Earth3 et GFDL.

La MME ne projette aucun changement de risque d'inondation ($RR \simeq 1$) sur plusieurs régions du Nord-Est-Sud ainsi que sur une partie du Centre-Ouest. Par ailleurs, MME prédit une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) au Nord, au Nord-Ouest, dans la région de Gisozi jusqu'au Lac Tanganyika (Rumonge).

Pour l'indice $Rx5day$ (Figure 4.24), EC-Earth3 et NorESM2 ne prévoient aucun changement de risque d'inondation sur une grande partie du Burundi ($RR \simeq 1$). Par ailleurs, on note une réduction de risque d'inondation ($RR < 1$) pour CNRM (une grande

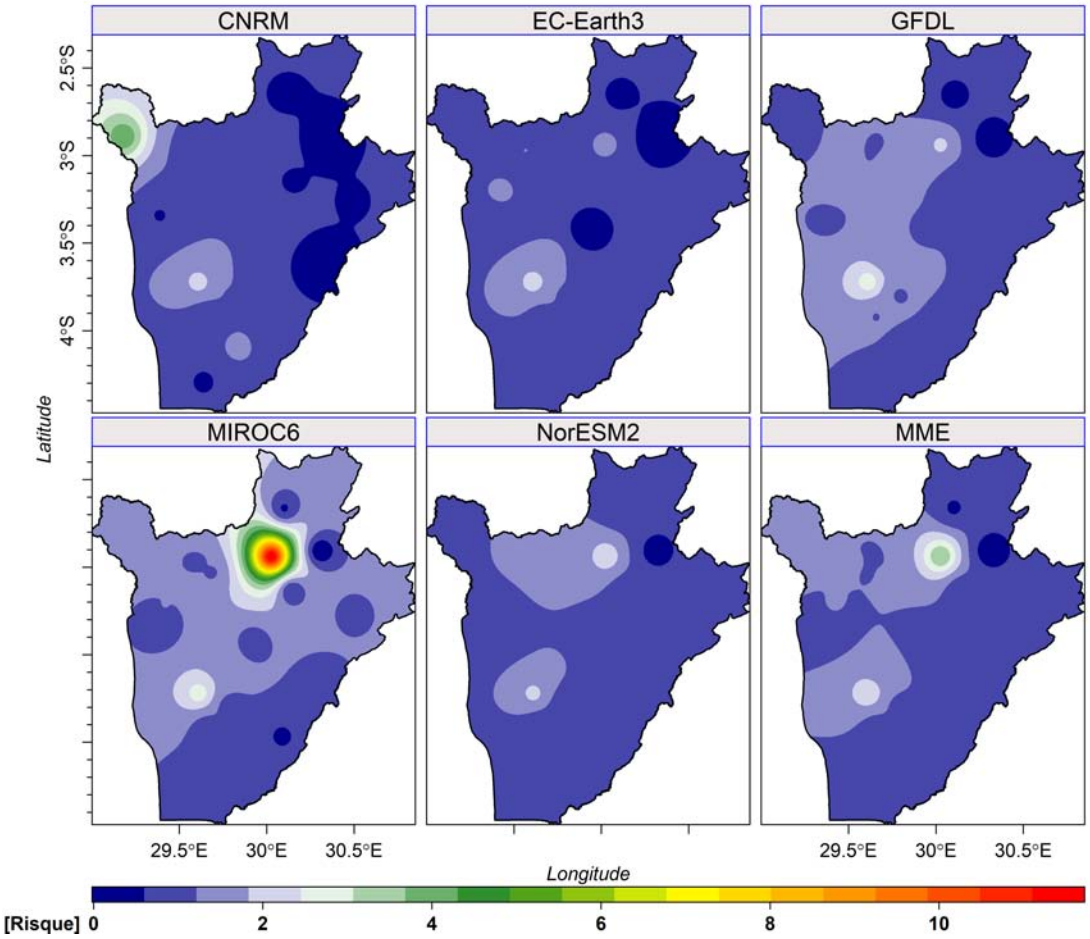



FIGURE 4.23 – Rapport de risque pour l'indice $Rx3day$ (2021-2060)

partie à l'Est), EC-Earth3 (une partie du Centre-Nord-Ouest), GFDL (région de Kirundo), MIROC6 (une partie au Sud-Est) et NorESM2 (certaines localités dans tout le pays).

D'autre part, il est projeté une augmentation de risque d'inondation ($RR > 1$) par les modèles CNRM (Sud-Ouest), EC-Earth3 (région de Cibitoke, une partie du Sud-Ouest et une petite partie du Nord-Est), GFDL (Centre-Sud et l'Ouest) et MIROC6 (une grande partie du pays). En effet, le modèle MIROC6 prévoit au Centre du Burundi, le risque d'inondation le plus élévé avec un $RR > 5$.

Quant à la MME, il est projeté une augmentation de risque d'inondation avec le $RR$ est compris entre 1 et 2 dans les régions du Nord-Ouest (Cibitoke), du Centre et du Sud-Ouest. Une réduction risque d'inondation ($RR < 1$) sur des petites localités dans presque tout le pays.

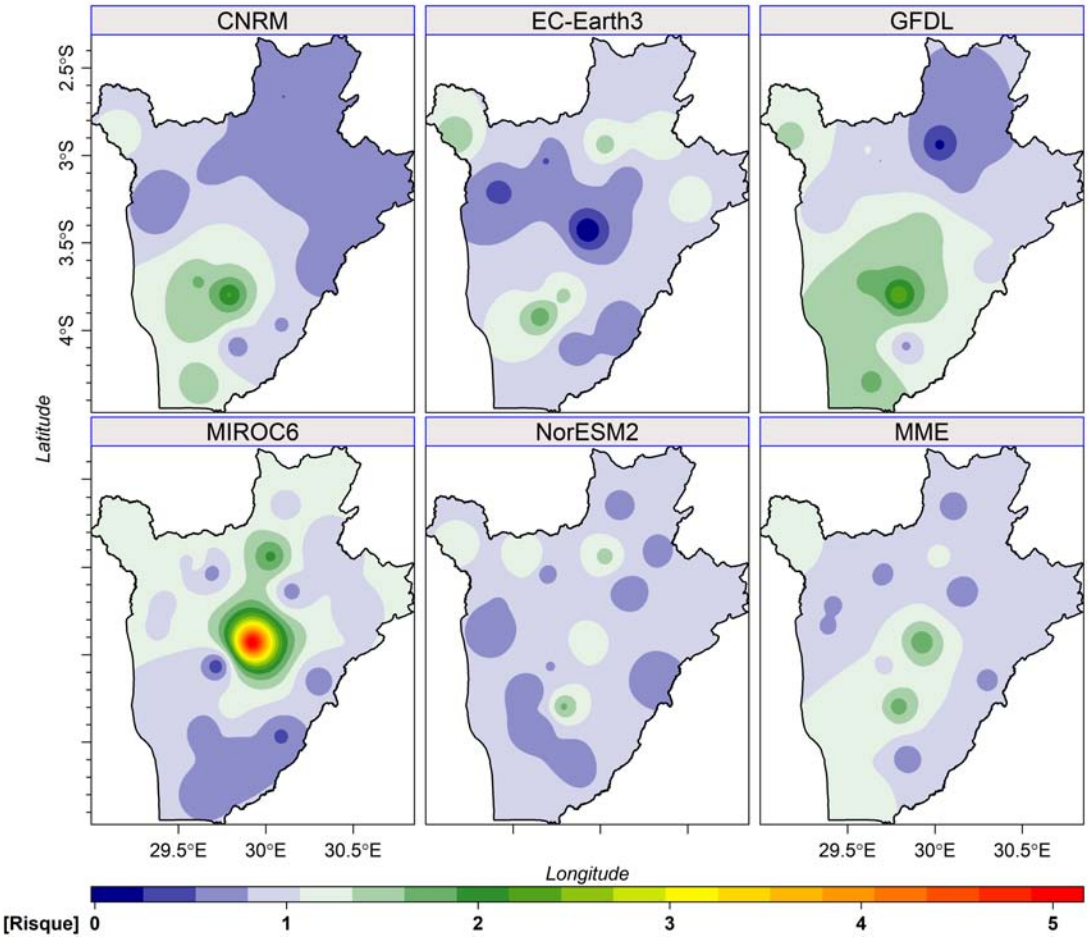



FIGURE 4.24 – Rapport de risque pour l'indice $Rx5day$ (2021-2060)

#### 4.1.5.2 Distribution spatiale de $RR$ sur la période $2061 - 2100$

La figure 4.25 montre les changements du risque d'inondation pour l'indice $Rx1day$ sur la période $2061 - 2100$. Nous remarquons qu'il est prédit une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) dans plusieurs régions du Burundi. De même, tous les modèles indiquent aussi une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$) à l'Est (Ruyigi). La réduction du risque d'inondation est aussi prévue dans les parties Nord (Kirundo et Kayanza) pour CNRM, au Centre-Ouest et à l'Est pour modèle MIROC6.

Les valeurs les plus élévées du risque d'inondation sont comprises entre 1.25 et 1.6. Ces valeurs sont situées à l'Est pour CNRM, au Nord pour GFDL, au Nord-Ouest pour EC-Earth3 et dans les régions du Nord-Est et de l'Est pour MIROC6 et NorESM2. Notons aussi des régions pour tous les modèles où les prédictions ne prévoient aucun changement du risque d'inondation ($RR \simeq 1$).

Pour la MME, il est projeté une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) dans les régions Nord, Ouest et une partie de l'Est. D'autre part, il n'est prévu aucun

changement ($RR = 1$) au cente et au Sud du Burundi. Par ailleurs, une partie de l'Est et du centre connaîtra une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$). Les différentes valeurs du $RR$ montrent clairement que les risques d'inondation seront inégalement distribuées dans le pays.

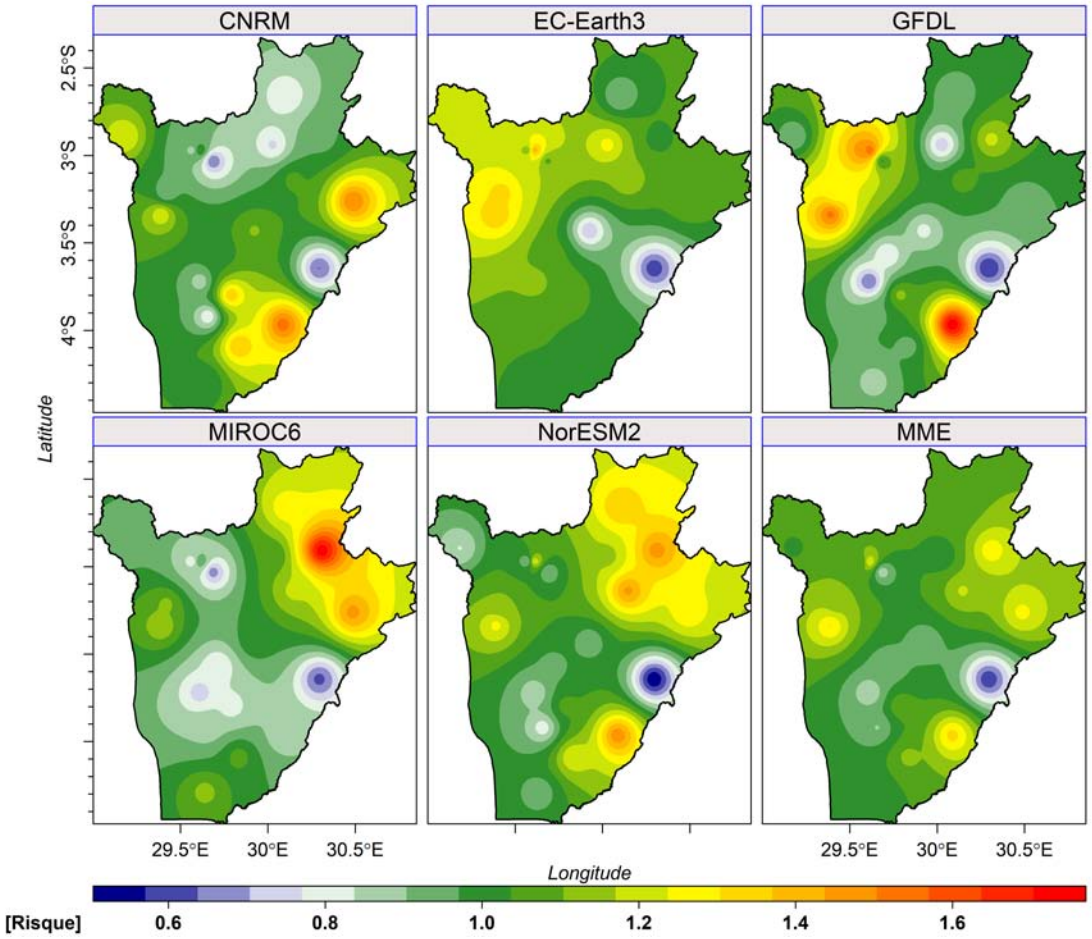



FIGURE 4.25 – Rapport de risque pour l'indice $Rx1day$ (2061-2100)

Pour l'indice $Rx3day$ (Figure 4.26), il est prévu une réduction du risque d'inondation avec un $RR$ légèrement inférieur à 1 sur une grande partie du Burundi pour les modèles EC-Earth3, GFDL et MIROC6. Par contre, les modèles CNRM et NorESM2 prévoient une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) sur tout le pays excepté le Nord-Est et le Sud. En effet, le modèle NorESM2 projette les plus grandes probabilités d'inondation à l'Ouest et sur une partie de la Crête Congo-Nil (Bururi).

La MME quant à elle, prédit une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$) dans le Nord-Est, le Sud et l'Est. Par ailleurs, une augmenation du risque d'inondation ($RR > 1$) est prévue sur le reste de la grande partie du Burundi à savoir l'Ouest, le Nord-Ouest, le centre et une partie de l'Est.

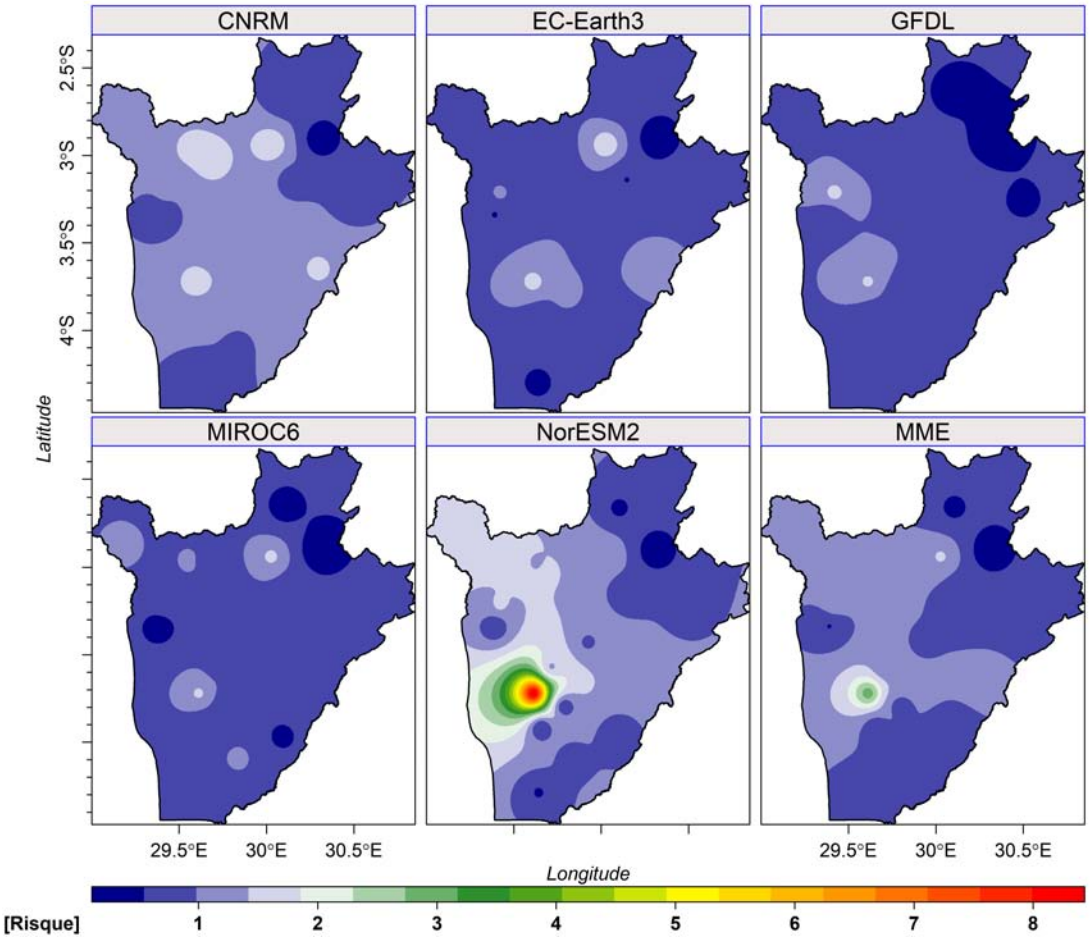



FIGURE 4.26 – Rapport de risque pour l'indice $Rx3day$ (2061-2100)

Pour l'indice $Rx5day$ (Figure 4.27), nous remarquons que les modèles CNRM et GFDL projettent une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) sur une grande partie du Burundi. Toutefois, notons pour ces mêmes modèles qu'il y aura des régions qui connaîtront une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$) notamment le Nord-Est, le Sud de la plaine de l'Imbo Nord et l'Est-Sud. Une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$) est aussi prédite par le reste des modèles sur la plupart des régions. La plus grande réduction du risque d'inondation ($RR \simeq 0.1$) est prévue au Sud (Makamba) par le modèle EC-earth3.

La MME projette une réduction du risque d'inondation ($RR < 1$) sur la plupart des régions du Burundi. Nous remarquons aussi quelques régions qui connaîtront une augmentation du risque d'inondation ($RR > 1$) ainsi que celles pour lesquelles aucun changement n'est prévu ($RR = 1$). Ces différentes projections montrent que le risque d'inondation ne sera pas uniformément distribué sur toutes les régions du Burundi.

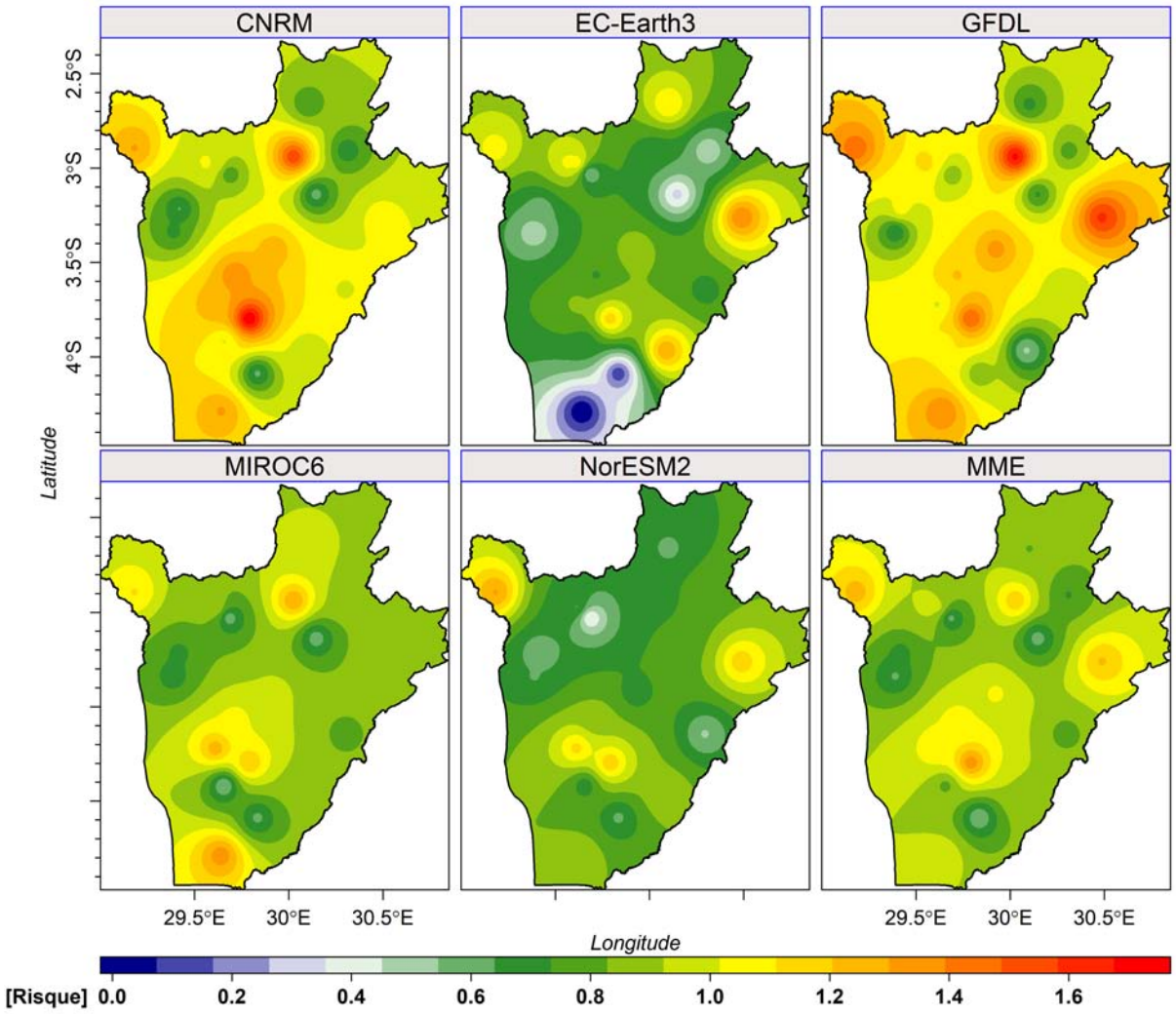



FIGURE 4.27 – Rapport de risque pour l'indice $Rx5day$ (2061-2100)

## 4.2 Discussion des résultats

Pour résumer, nous avons utilisé un ensemble de grands modèles issus du projet d'intercomparaison des modèles couplés CMIP6 pour étudier l'évolution des événements des précipitations extrêmes en raison du réchauffement climatique. En utilisant le scénario d'émissions $SSP5-85$, les futures simulations des modèles ont été comparées à la période de référence des séries historiques. La distribution GEV a été ajustée aux extrêmes annuels de précipitations.

Nous remarquons que les résultats diffèrent d'une région à l'autre selon le modèle utilisé (comme les figures 4.1 à 4.27 l'illustrent). Cela est dû au fait que les modèles utilisés diffèrent par leur conception d'origine : leur résolution spatiale, la mesure dans laquelle les rétroactions du système terrestre sont incorporées, etc [Krueger *et al.*, 2015].

L'étude des événements extrêmes en utilisant les simulations des modèles climatiques a fait l'objet d'autres travaux de recherche. Au Burundi, les modèles climatiques régionaux ont été par exemple utilisés dans le « Rapport sur le changement climatique au Burundi » [Liersch et Rocio Rivas, 2014]. Dans ce Rapport, Liersch et Rocio ont trouvé que les précipitations augmenteront dans l'avenir au Burundi en raison du réchauffement climatique. De la même manière qu'eux, nos résultats ont montré que les extrêmes de précipitations s'intensifieront au Burundi dans le futur proche et lointain. Ceci a été diagnostiqué en déterminant les changements dans les paramètres de la distribution GEV sur tout le Burundi pour les trois indices de précipitations extrêmes entre les périodes future et historique (Figure 4.4 à 4.21). Nos résultats sont aussi en accord avec ceux de Ayugi et ses collaborateurs [Ayugi *et al.*, 2021a] sur les extrêmes de précipitations futures en Afrique de l'Est.

D'autres études sur l'évolution future des températures extrêmes ont été réalisées à laide de la méthode GEV et des modèles climatiques de CMIP6 [Slater *et al.*, 2021], [Schär *et al.*, 2004]. Dans leurs travaux, ils ont trouvé que les changements importants des températures seront anormalement élevées dans le futur. Dans la plupart des cas, le changement sera dominé par les changements de la moyenne dans la distribution future des températures extrêmes. C'est par exemple le cas des études en Europe Centrale [Krueger *et al.*, 2015], [Chan *et al.*, 2020], [Hegerl *et al.*, 2004] dans lesquelles une tendance à l'élargissement de la distribution future des températures extrêmes a été signalée.

Ainsi, notre étude sur la probabilité d'occurrence des futures extrêmes de précipitations nous permet de constater que le paramètre de position $\mu$ domine la tendance globale des changements. Des augmentations significatives dans la plupart des régions pour les indices $Rx1day$, $Rx3day$ et $Rx5day$ ont été signalées. Le paramètre d'échelle $\sigma$ présente également une tendance à la hausse dans certaines régions pour les différents indices et pour les différents modèles. La plupart des modèles s'accordent également sur les changements du paramètre de forme $\xi$.

Les $RR$ indiquant la probabilité d'occurrence du risque d'inondation diffèrent d'une région à l'autre selon le modèle utilisé (comme l'illustrent les figures 4.22 à 4.27). Les $RR$ révèlent de légères augmentations et diminutions pour les deux périodes futures (Tableau 4.1). En effet, pour la période $2021-2060$, les résultats de $MME$ montrent que $RR = 1.08$ pour l'indice $Rx1day$ et $RR = 1.15$ pour l'indice $Rx3day$ sur l'ensemble du Burundi. Ces valeurs signifient qu'il est prévu d'ici 2060 une légère augmentation du risque d'inondation par rapport à la période $1981 - 2020$ relativement à ces deux indices. Par contre, le $RR = 1.01 \equiv 1$ pour l'indice $Rx5day$. Cela signifie qu'il n'est projeté aucun changement de risque d'inondation lié à l'indice $Rx5day$ sur la période $2021 - 2060$.

D'un autre côté, au cours de la période $2061-2100$, il est prévu une légère augmentation du risque d'inondation relative à l'indice $Rx1day$ tandis qu'une légère diminution est prévue pour les indices $Rx3day$ et $Rx5day$ (Tableau 4.1).

## 4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de notre étude. Les caractéristiques des paramètres d'ajustement de la distribution GEV ainsi que leurs changements projetés ont été mis en évidence pour Rx1day, Rx3day et Rx5day. Les $RR$ ont révélé des cas d'augmentation de la probabilité de l'occurence des fortes précipitations susceptibles de causes des inondations dans l'avenir. Les régions qui seront les plus touchées et celles qui seront moins affectées ont été localisées.

# Chapitre 5

# Conclusion générale, recommandations et perspectives

Dans ce dernier chapitre, nous allons d'abord donner la conclusion générale de ce travail de mémoire. Ensuite, nous allons formuler les recommandations. Enfin, nous présentons nos perspectives de la recherche.

## 5.1 Conclusion générale

L'intérêt scientifique existant actuellement pour l'analyse des phénomènes climatiques extrêmes résulte du fait qu'ils témoignent d'une certaine non-linéarité importante et leurs conséquences économiques, sociales et environnementales sont énormes. Dans ce travail, nous avons mené une étude sur les extrêmes de précipitations, plus particulièrement les maxima de pécipitations, dans le climat futur du Burundi à l'aide des modèles climatiques les plus récents du CMIP6.

Ainsi, nous avons présenté dans un premier temps un aperçu sur les événements extrêmes. A cette issue, nous avons dressé un état de lieu de ces événements liés aux précipitations au Burundi. Par la suite, nous avons présenté les objectifs de ce travail de recherche, notre contribution, les limites ainsi que les résultats attendus et les bénéficiaires. Dans un deuxième temps, nous avons décrit d'une façon brève le Burundi comme lieu d'étude et le paramètre atmosphérique d'étude. Dans un troisième volet, nous avons décrit les données utilisées de ce paramètre ainsi que les méthodes appliquées.

L'approche des maxima par bloc conduisant à un modèle de la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) a été appliquée aux maxima annuels des cumuls de précipitations journalières. Ces dernières ont été collectées au Burundi sur la période de 1981-2020. Puis, ce modèle a été appliqué aux futures simulations des modèles climatiques

sur les périodes $2021-2060$ et $2061-2100$. Les futures simulations des modèles ont été enfin comparées à la période de référence.

En effet, nous avons constaté que :

- Le paramètre de position $\mu$ des distributions ajustées domine la tendance globale des changements de distributions pour les trois indices considérés Rx1day, Rx3day et Rx5day. Il a été noté des augmentations significatives de $\mu$ dans plusieurs régions correspondant à l'augmentation de l'ampleur des événements extrêmes. Le paramètre d'échelle $\sigma$, indiquant la variabilité des extrêmes, présente aussi une tendance à l'augmentation dans certaines régions et à la réduction dans d'autres. De la même manière, les changements du paramètre de forme $\xi$ présentent aussi des tendances non uniformes.
- Les $RR$ indiquent de légères augmentations pour les indices $Rx1day$ et $Rx3day$ sur l'ensemble du Burundi sur la période $2021-2060$ ainsi que pour l'indice $Rx1day$ sur la période $2061-2100$. Ces augmentations montrent que nous devrions nous attendre à une intensification des événements extrêmes dus aux fortes précipitations causées par le réchauffement climatique. Les régions qui seront les plus touchées et celles qui seront les moins affectées par les inondantions ont été identifiées. Ainsi, des mesures d'adaptation et d'atténuation devraient être mises en oeuvre pour les localités sous risque d'inondation afin de limiter les dommages. D'autre part, les localités avec moins de risque d'inondantions devraient être protégées et exploitées pour le dévéloppement durable du Burundi.

## 5.2 Recommandations

Sur base des résultats de notre travail de recherche, nous recommandons :

– Aux décideurs politiques, de se référer à ces résultats afin de donner des orientations futures à la population qui tiennent compte des prédictions climatiques notamment dans le domaine de l'agriculture, des infrastructures et de l'élaboration des projets.

– A toutes les institutions, agences et individus intervenant dans le secteur de transport ainsi que les ingénieurs qui dimensionnent les infrastructures, de consulter nos résultats dans leurs projets futurs. Cela leur permettra d'éviter les pertes en matériels et en vies humaines suite aux inondations.

– Aux banques, d'évaluer les risques d'inondation avant de contracter des crédits de financement surtout à long terme dans le domaine de l'agriculture et des infrastructures.

– A la communauté scientifique, de se servir de ces résultats comme un outil de référence pour ses études.

## 5.3 Perspectives

Comme la variabilité du climat est très complexe, des travaux supplémentaires devraient être menés afin de bien comprendre le risque futur des événements extrêmes de précipitations. C'est dans cette perspective que notre travail n'est pas exhaustif. Dans nos futures recherches, nous envisageons d'appliquer le même processus utilisé dans cette étude au cas complexe des températures et des précipitations afin d'estimer les niveaux et les durées de retour des précipitations et des températures extrêmes au Burundi. Dans la même lancée, nous comptons étendre notre étude sur plusieurs stations météorologiques des pays d'Afrique de l'Est et mener une étude pareille sur cette région.

# Bibliographie

[Asadullah *et al.*, 2008] Asadullah, A., McIntyre, N. et Kigobe, M. (2008). Evaluation of five satellite products for estimation of rainfall over uganda/evaluation de cinq produits satellitaires pour l'estimation des précipitations en ouganda. *HYDROLOG SCI J*, 53(6):1137–1150.

[Ashouri *et al.*, 2015] Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., Nelson, B. R. et Prat, O. P. (2015). Persiann-cdr : Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *B AM METEOROL SOC*, 96(1):69–83.

[Atlas et Ulbrich, 1977] Atlas, D. et Ulbrich, C. (1977). Path and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *J. Appl. Meteorol.*, 16:1322–1331.

[Ayehu *et al.*, 2018] Ayehu, G. T., Tadesse, T., Gessesse, B. et Dinku, T. (2018). Validation of new satellite rainfall products over the upper blue nile basin, ethiopia. *Atmos. Meas. Tech.*, 11(4):1921–1936.

[Ayugi *et al.*, 2021a] Ayugi, B., Dike, V., Ngoma, H., Babaousmail, H., Mumo, R. et Ongoma, V. (2021a). Future changes in precipitation extremes over east africa based on CMIP6 models. *Water*, 13(17):2358.

[Ayugi *et al.*, 2021b] Ayugi, B., Ngoma, H., Babaousmail, H., Karim, R., Iyakaremye, V., Sian, K. T. L. K. et Ongoma, V. (2021b). Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over east africa. *J Afr Earth Sci*, 181:104226.

[Ayugi *et al.*, 2019] Ayugi, B., Tan, G., Ullah, W., Boiyo, R. et Ongoma, V. (2019). Inter-comparison of remotely sensed precipitation datasets over kenya during 1998–2016. *Atmos. Res.*, 225:96–109.

[Babaousmail *et al.*, 2019] Babaousmail, H., Hou, R., Ayugi, B. et Gnitou, G. T. (2019). Evaluation of satellite-based precipitation estimates over algeria during 1998–2016. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 195:105139.

[Behrangi *et al.*, 2011] Behrangi, A., Khakbaz, B., Jaw, T. C., AghaKouchak, A., Hsu, K. et Sorooshian, S. (2011). Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *J. Hydrol.*, 397(3-4):225–237.

[Beniston *et al.*, 2007] Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B. *et al.* (2007). Future extreme events in european climate : an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change*, 81:71–95.

[Cannon *et al.*, 2015] Cannon, A. J., Sobie, S. R. et Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping : how well do methods preserve changes in quantiles and extremes ? *J. Clim.*, 28(17):6938–6959.

[Chan *et al.*, 2020] Chan, D., Cobb, A., Zeppetello, L. R. V., Battisti, D. S. et Huybers, P. (2020). Summertime temperature variability increases with local warming in midlatitude regions. *Geophys. Res. Lett.*, 47(13):e2020GL087624.

[Coles *et al.*, 2001] Coles, S., Bawa, J., Trenner, L. et Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*, volume 208. Springer.

[Dalezios et Zarpas, 1996] Dalezios, N. et Zarpas, C. (1996). The role of ndvi and meteorological indices in the phenology of cotton, vineyards and apples in greece. *In International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, pages 24–26.

[DE SAEGER, 1954] DE SAEGER, M. H. (1954). Exploration du Parc National de la Garamba. *Introduction. Brussels : Institut des parcs nationaux du Congo Belge.*

[Décamps, 2007] Décamps, H. (2007). La vulnérabilité des systèmes socioécologiques aux événements extrêmes : exposition, sensibilité, résilience. *Nat. Sci. Soc*, 15(1):48–52.

[Decamps, 2010] Decamps, H. (2010). *Evènements climatiques extrêmes.* EDP sciences.

[Deng *et al.*, 2019] Deng, P., Zhang, M., Bing, J., Jia, J. et Zhang, D. (2019). Evaluation of the gsmap_gauge products using rain gauge observations and swat model in the upper hanjiang river basin. *Atmos. Res.*, 219:153–165.

[Diem *et al.*, 2014] Diem, J. E., Hartter, J., Ryan, S. J. et Palace, M. W. (2014). Validation of satellite rainfall products for western uganda. *J. Hydrometeorol.*, 15(5): 2030–2038.

[Dinku *et al.*, 2018] Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H. et Ceccato, P. (2018). Validation of the chirps satellite rainfall estimates over eastern africa. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 144:292–312.

[Endris *et al.*, 2013] Endris, H. S., Omondi, P., Jain, S., Lennard, C., Hewitson, B., Chang'a, L., Awange, J., Dosio, A., Ketiem, P., Nikulin, G. *et al.* (2013). Assessment of the performance of cordex regional climate models in simulating east african rainfall. *J. Clim.*, 26(21):8453–8475.

[Eyring *et al.*, 2015] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. et Taylor, K. (2015). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8(12).

[Eyring *et al.*, 2016] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. et Taylor, K. E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5):1937–1958.

[FAO, 2015] FAO (2015). *The impact of natural hazards and disasters on agriculture, food security and nutrition.* `https://openknowledge.fao.org/bitstreams/ff476ceb-d044-438d-b4f8-fb027c76c05c/download`, consulté le 6 Juin 2024.

[Faranda, 2020] Faranda, D. (2020). *Physique-Statistique Des Événements Extrêmes Géophysiques*. Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

[Fauzi *et al.*, 2020] Fauzi, F., Kuswanto, H. et Atok, R. (2020). Bias correction and statistical downscaling of earth system models using quantile delta mapping (qdm) and bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering (bccaq). *In J. Phys. Conf. Ser.*, volume 1538, page 012050. IOP Publishing.

[Gahiro, 2011] Gahiro, L. (2011). *Compétitivité des filières rizicoles burundaises : le riz de l'Imbo et le riz des marais*. Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIEGE-GEMBLOUX AGRO-BIO TECH ; Université de Liège.

[Gardiner *et al.*, 2020] Gardiner, B., Orazio, C., Cablat, D. et Yoga, S. (2020). Gestion du risque tempête en nouvelle aquitaine. *Cestas : Institut Européen de la Forêt Cultivée. 47p.*

[Gemenne *et al.*, 2017] Gemenne, F., Blocher, J. M. D., De Longueville, F., Vigil Diaz Telenti, S., Zickgraf, C., Gharbaoui, D. et Ozer, P. (2017). Changement climatique, catastrophes naturelles et déplacements de populations en afrique de l'ouest. *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 41(3).

[GIEC, 2007] GIEC (2007). Changement climatique 2007 : impacts, adaptation et vulnérabilité. *contribution du GT II au quatrième Rapport d'évaluation (RE4) du GIEC,*.

[GIEC, 2012] GIEC, Field, C. B. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.

[Giraldo, 2021] Giraldo, H. D. A. (2021). *Efficiency improvement and climate change : what energy policies ?* Université Rennes 1. `https://theses.hal.science/tel-03705775/document`, consulté le 22 Juin 2024.

[Gunn et Kinzer, 1949] Gunn, R. et Kinzer, G. (1949). The terminal velocity of fall for water droplet in stagnant air. *J. Meteorol.*, 6:243–248.

[Hallegatte, 2005] Hallegatte, S. (2005). Interactions d'échelles en économie : Application à l'évaluation des dommages économiques du changement climatique et des événements extrêmes. *Thèse de doctorat, École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris*.

[Harris *et al.*, 2014] Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. et Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations–the cru ts3. 10 dataset. *Int. J. Climatol.*, 34(3):623–642.

[Hartkamp *et al.*, 1999] Hartkamp, A., De Beurs, K., Stein, A. et White, J. (1999). Interpolation techniques for climate variables, nrg-gis series 99-01. *CIMMyt, Mexico, DF*.

[Hegerl *et al.*, 2004] Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Stott, P. A. et Kharin, V. V. (2004). Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *J. Clim.*, 17(19):3683–3700.

[Hountondji, 2008] Hountondji, Y.-C. H. (2008). Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'afrique de l'ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. *Belgique : Université de Liège*.

[Hsu *et al.*, 1997] Hsu, K.-l., Gao, X., Sorooshian, S. et Gupta, H. V. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 36(9):1176–1190.

[Indeje *et al.*, 2001] Indeje, M., Semazzi, F. H., Xie, L. et Ogallo, L. J. (2001). Mechanistic model simulations of the east african climate using ncar regional climate model : influence of large-scale orography on the turkana low-level jet. *J. Clim.*, 14(12):2710–2724.

[IPCC, 2007] IPCC (2007). Climate change 2007 : The physical science basis. *Agenda*, 6(07):333.

[ISTEEBU, 2017] ISTEEBU (2017). *Troisième Enquête Démographique et de Santé au Burundi (EDSB-III) 2016- 2017 Indicateurs Clés*. Bujumbura.

[ISTEEBU, 2019] ISTEEBU (2019). *Analyse secondaire des données de l'enquête démographique et de santé du Burundi (EDS 2016-2017)*. Bujumbura.

[Jalbert, 2015] Jalbert, J. (2015). *Développement d'un modèle statistique non stationnaire et régional pour les précipitations extrêmes simulées par un modèle numérique de climat*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE).

[Jha *et al.*, 2012] Jha, A. K., Bloch, R. et Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding : A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. World Bank. `https://www.batukarinfo.com/system/files/Cities%20and%20Flooding%20Guidebook-1a.pdf`, consulté le 21 Juin 2024.

[Kabanyegeye *et al.*, 2020] Kabanyegeye, H., Masharabu, T., Yannick, U. S. et Bogaert, J. (2020). Perception sur les espaces verts et leurs services écosystémiques par les acteurs locaux de la ville de bujumbura (république du burundi). *Tropicultura*, 38.

[Kessler, 1969] Kessler, E. (1969). *On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation*. American Meteorological Society.

[Kharin *et al.*, 2018] Kharin, V., Flato, G., Zhang, X., Gillett, N., Zwiers, F. et Anderson, K. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5 c to 2.0 c depending on rarity. *Earth's Future*, 6(5):704–715.

[Kharin *et al.*, 2013] Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. et Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Clim. Change*, 119:345–357.

[Kirchmeier-Young *et al.*, 2019] Kirchmeier-Young, M., Wan, H., Zhang, X. et Seneviratne, S. I. (2019). Importance of framing for extreme event attribution : The role of spatial and temporal scales. *Earth's Future*, 7(10):1192–1204.

[Krueger *et al.*, 2015] Krueger, O., Hegerl, G. C. et Tett, S. F. (2015). Evaluation of mechanisms of hot and cold days in climate models over central europe. *Environ. Res. Lett.*, 10(1):014002.

[Lewalle, 1972] Lewalle, J. (1972). Les étages de végétation du burundi occidental. *Bulletin du Jardin botanique national de Belgique*, pages 1–247.

[Liersch et Rocio Rivas, 2014] Liersch, D. S. et Rocio Rivas, K. F. (2014). *Rapport sur le changement climatique au Burundi*. Bujumbura.

[Luhunga *et al.*, 2016] Luhunga, P., Botai, J. et Kahimba, F. (2016). Evaluation of the performance of cordex regional climate models in simulating present climate conditions of tanzania. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 66(1):32–54.

[Manirakiza *et al.*, 2019] Manirakiza, C., Emmanuel, L. A., Batablinlè, N. M. et Lamboni (2019). Spatio-temporal analysis of climate change impact on future wind power potential in burundi (east africa). *Am. J. Clim. Change*, 8(2):237–262.

[Martin *et al.*, 2018] Martin, K. K., Lazare, K. K., Blaise, Y. K., Hermann, M. N., Jean, B., Théophile, L. et Rouché, N. (2018). Variabilité des extrêmes pluviométriques sur le bassin versant de la rivière bia (sud-est, cote d'ivoire). *European Scientific Journal*, 14(2):134.

[MATTE, 2007] MATTE (2007). *Plan d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques « PANA »*. Bujumbura. `https://unfccc.int/resource/docs/napa/bdi01f.pdf`, consulté le 6 Juin 2024.

[McCarthy, 2001] McCarthy, J. J. (2001). *Climate change 2001 : impacts, adaptation, and vulnerability : contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, volume 2. Cambridge University Press.

[MEAE, 2017] MEAE (2017). *Politique Nationale de l'Elevage au Burundi.* Bujumbura. `https://bi.chm-cbd.net/fr/documents/pol-nat-elevage-bdi`, consulté le 6 Juin 2024.

[MEAE, 2019] MEAE (2019). *Troisième Communnication Nationale sur les Changements Climatiques(TCNCC)*. Bujumbura.

[MEEATU, 2013] MEEATU (2013). *Politique nationale sur le changement climatique*. Bujumbura. `https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2020-12/politique-cc-bi.pdf`, consulté le 6 Juin 2024.

[MEEATU, 2014a] MEEATU (2014a). *Rapport sur le changement climatique au Burundi*. Bujumbura.

[MEEATU, 2014b] MEEATU (2014b). *Stratégie de Communication, d'Education et de Sensibilisation du Public sur la Biodiversité du Burundi (CESPB)*. Bujumbura. `https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2020-05/strat-commu-educa-sensibili-bi.pdf`, consulté le 6 Juin 2024.

[Meehl *et al.*, 2000] Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M. et Stouffer, R. J. (2000). The coupled model intercomparison project (CMIP). *B AM METEOROL SOC*, 81(2):313–318.

[Michel SCHLAIFER, 2007] Michel SCHLAIFER, P. N. (2007). Profil environnemental de pays (PEP) du burundi.

[Moss *et al.*, 2010] Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T. *et al.* (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747–756.

[Mumo et Yu, 2020] Mumo, L. et Yu, J. (2020). Gauging the performance of CMIP5 historical simulation in reproducing observed gauge rainfall over kenya. *Atmos. Res.*, 236:104808.

[Ndayisenga, 2010] Ndayisenga, A. (2010). *La reproduction d'un système paysan à travers les revenus extérieurs à l'exploitation : le cas de la région du Bututsi au Burundi*. Thèse de doctorat, Toulouse 2.

[Nibasumba *et al.*, 2013] Nibasumba, A., Bielders, C. et Jassogne, J. (2013). Evaluation agronomiqu e de l'association bananiers-caféiers : Application au burundi. *Earth and Life Institute Environmental Sciences*, pages 1–336.

[Nkunzimana *et al.*, 2020a] Nkunzimana, A., Bi, S., Alriah, M. A. A., Zhi, T. et Kur, N. A. D. (2020a). Comparative analysis of the performance of satellite-based rainfall products over various topographical unities in central east africa : case of burundi. *Earth and Space Science*, 7(5):e2019EA000834.

[Nkunzimana *et al.*, 2020b] Nkunzimana, A., Bi, S., Alriah, M. A. A., Zhi, T. et Kur, N. A. D. (2020b). Diagnosis of meteorological factors associated with recent extreme rainfall events over burundi. *Atmos. Res.*, 244:105069.

[Nkunzimana *et al.*, 2021] Nkunzimana, A., Shuoben, B., Guojie, W., Alriah, M. A. A., Sarfo, I., Zhihui, X., Vuguziga, F. et Ayugi, B. O. (2021). Assessment of drought events, their trend and teleconnection factors over burundi, east africa. *Theor. Appl. Climatol.*, 145:1293–1316.

[Nkurunziza, 1996] Nkurunziza, F.-X. (1996). Analyse des principales contraintes de développement des régions de montagnes du burundi. *Donnay J.-P., Chevigné Cl.(éd. scientifiques), Recherches de géographie humaine. Hommage au Professeur Charles Christians, Société Géographique de Liège, n hors-série*, pages 321–326.

[Nzigidahera, 2012] Nzigidahera (2012). Description du burundi : Aspects physiques.

[Ogwang *et al.*, 2015] Ogwang, B. A., Chen, H., Tan, G., Ongoma, V. et Ntwali, D. (2015). Diagnosis of east african climate and the circulation mechanisms associated with extreme wet and dry events : a study based on regcm4. *Arabian Journal of Geosciences*, 8:10255–10265.

[OMM, 2017] OMM (2017). Organisation météorologique mondiale : Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques. `https://library.wmo.int/viewer/54922/download?file=1203_fr.pdf&type=pdf&navigator=1`, consulté le 6 Juin 2024.

[O'Neill *et al.*, 2016] O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J. *et al.* (2016). The scenario model intercomparison project (scenariomip) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9):3461–3482.

[Ongoma *et al.*, 2018a] Ongoma, V., Chen, H. et Gao, C. (2018a). Projected changes in mean rainfall and temperature over east africa based on cMIP5 models. *Int. J. Climatol.*, 38(3):1375–1392.

[Ongoma *et al.*, 2019] Ongoma, V., Chen, H. et Gao, C. (2019). Evaluation of cmip5 twentieth century rainfall simulation over the equatorial east africa. *Theor. Appl. Climatol.*, 135(3):893–910.

[Ongoma *et al.*, 2018b] Ongoma, V., Chen, H. et Omony, G. W. (2018b). Variability of extreme weather events over the equatorial east africa, a case study of rainfall in kenya and uganda. *Theor. Appl. Climatol.*, 131(1-2):295–308.

[ONU, 2019] ONU (2019). Deux milliards de personnes de plus sur la terre en 2050. `https://news.un.org/fr/story/2019/06/1045681`, consulté le 30 Mai 2024.

[Pachauri et Reisinger, 2008] Pachauri, R. K. et Reisinger, A. (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse.* GIEC.

[Pascal, 2004] Pascal, G. (2004). *Maximisation numérique et mesures acoustiques des précipitations.* Thèse de doctorat, Lausanne, EPFL.

[PNPRGC, 2014] PNPRGC (2014). *Analyse des facteurs de risques, évaluation des dommages et propositions pour un relèvement et une reconstruction durables.* Washington DC.

[Pozy, 1989] Pozy, P. (1989). mÿ "intégration de l'agriculture et de l'élevage en exploitations familiales. *Tropicultura*, 7(2):6875.

[Qian et Chang, 2021] Qian, W. et Chang, H. H. (2021). Projecting health impacts of future temperature : a comparison of quantile-mapping bias-correction methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(4):1992.

[Raggad, 2009] Raggad, B. (2009). Fondements de la théorie des valeurs extrêmes, ses principales applications et son apport à la gestion des risques du marché pétrolier. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, (186):29–63.

[Rao *et al.*, 2017] Rao, S., Klimont, Z., Smith, S. J., Van Dingenen, R., Dentener, F., Bouwman, L., Riahi, K., Amann, M., Bodirsky, B. L., van Vuuren, D. P. *et al.* (2017). Future air pollution in the shared socio-economic pathways. *Glob. Environ. Change*, 42:346–358.

[Riahi *et al.*, 2017] Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. *et al.* (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview. *Glob. Environ. Change*, 42:153–168.

[Robin *et al.*, 2021] Robin, Y., Drouin, A., Soubeyroux, J.-M., Ribes, A. et Vautard, R. (2021). Comment attribuer une canicule au changement climatique ? *La Météorologie*, 2021(115):28–36.

[SABUSHIMIKE, 2017] SABUSHIMIKE, J. M. (2017). *République du Burundi*. Bujumbura. `https://www.obpe.bi/wp-content/uploads/2023/04/circonstances_nationales_cc.pdf`, consulté le 26 Juin 2024.

[Sahoo *et al.*, 2015] Sahoo, A. K., Sheffield, J., Pan, M. et Wood, E. F. (2015). Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (tmpa) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sens. Environ.*, 159:181–193.

[Salathé Jr *et al.*, 2007] Salathé Jr, E. P., Mote, P. W. et Wiley, M. W. (2007). Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the united states pacific northwest. *Int. J. Climatol. : Q. J. Roy.*, 27(12):1611–1621.

[Schär *et al.*, 2004] Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A. et Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves. *Nature*, 427(6972):332–336.

[Schwartz et Ecofit, 2003] Schwartz, D. et Ecofit, G. (2003). Changements climatiques. *Peuplements anciens et actuels des forêts tropicales*, page 157.

[Seneviratne *et al.*, 2012] Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M. *et al.* (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA*, pages 109–230.

[SINDAYIHEBURA et NKUNZIMANA, 2020] SINDAYIHEBURA, J. F. R. et NKUNZIMANA, A. (2020). Changement climatique et anemie des femmes en age de procreer au burundi. approche par la region de residence. *Revue de l'Université du Burundi Série Sciences Humaines et Sociales N.*

[Slater *et al.*, 2021] Slater, R., Freychet, N. et Hegerl, G. (2021). Substantial changes in the probability of future annual temperature extremes. *Atmospheric Science Letters*, 22(11):e1061.

[Smith, 2003] Smith, R. L. (2003). Statistics of extremes, with applications in environment, insurance and finance. *Extreme values in finance, telecommunications and the environment*, 1:78.

[Smith, 1982] Smith, S. (1982). An index of windiness for the united kingdom.

[Spilhaus, 1948] Spilhaus, A. (1948). Raindrop size shape and falling speed. *J. Meteorol.*, 5:108–110.

[Stéphan, 2018] Stéphan, J.-F. (2018). changement climatique et développement durable. *Mémoire de Master 1, Faculté des Lettres, Langues et Sciences Humaines, Université d'Angers.*

[Sylla *et al.*, 2013] Sylla, M., Giorgi, F., Coppola, E. et Mariotti, L. (2013). Uncertainties in daily rainfall over africa : assessment of gridded observation products and evaluation of a regional climate model simulation. *Int. J. Climatol.*, 33(7):1805–1817.

[Taylor *et al.*, 2012] Taylor, K. E., Stouffer, R. J. et Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *B AM METEOROL SOC*, 93(4):485–498.

[Ullah *et al.*, 2019] Ullah, W., Wang, G., Ali, G., Tawia Hagan, D. F., Bhatti, A. S. et Lou, D. (2019). Comparing multiple precipitation products against in-situ observations over different climate regions of pakistan. *Remote Sens.*, 11(6):628.

[Van Vuuren *et al.*, 2017] Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E., Doelman, J. C., Van den Berg, M., Harmsen, M., de Boer, H. S., Bouwman, L. F., Daioglou, V., Edelenbosch, O. Y. *et al.* (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Glob. Environ. Change*, 42:237–250.

[Wang *et al.*, 2017] Wang, Z., Zhong, R., Lai, C. et Chen, J. (2017). Evaluation of the gpm imerg satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmos. Res.*, 196:151–163.

[Wehner, 2005] Wehner, M. (2005). Changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in the ipcc ar4 models. *US CLIVAR Variations*, 3(3):5–9.

[Woodcock, 2002] Woodcock, N. (2002). Ipcc 2002. climate change 2001 : Synthesis report. *Geological Magazine*, 139(4):489–492.

[Yang *et al.*, 2015] Yang, W., Seager, R., Cane, M. A. et Lyon, B. (2015). The rainfall annual cycle bias over east africa in CMIP5 coupled climate models. *J. Clim.*, 28(24): 9789–9802.

[Zelinka *et al.*, 2020] Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A. et Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophys. Res. Lett.*, 47(1):e2019GL085782.

[Zwiers et Kharin, 1998] Zwiers, F. W. et Kharin, V. V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by ccc gcm2 under co2 doubling. *J. Clim.*, 11(9):2200–2222.