

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI



=====  
INSTITUT NATIONAL DE  
L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN  
EAU

Mémoire de fin de formation réalisée par :

**BAHOUNKOLE Hippolyte M. Abib**

Pour l'obtention du diplôme de

**Licence Professionnelle en Hydrologie**

**OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE**

=====  
Evaluation de la performance des données réanalyses ERA5 et  
MERRA2 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérrou  
=====

**COMPOSITION DU JURY**

**Président** : Prof Eric ALAMOU

**Examineur** : Dr Arcadius DEGAN

**Rapporteur** : Mr René BODJRENOU

**Maître de Mémoire**

Dr N'TCHA M'PO Yèkambèssoun

**Maître de Stage**

BODJRENOU René



Promotion 2018-2021

## **DEDICACE**

Je dédie ce travail

A L'Eternel **Dieu tout puissant** et à ma famille qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Mon père **BANKOLE JOACHIM** et à ma mère **BOSSOU Josée**, pour le gout à l'effort qu'ils ont suscité en moi, de par leur rigueur.

## REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements et ma reconnaissance à un certain nombre de personnes sans qui ce travail n'aurait pas été possible :

- **Prof. Abdoukarim ALASSANE**, le Chef du Département pour tous les sacrifices consentis pour la formation des étudiants ;
- L'ensemble du corps professoral et administratif de l'INE, plus particulièrement tous ceux qui ont été mes enseignants. Merci pour avoir su donner à nous les étudiants, le nécessaire pendant ces trois dernières années de formation ;
- **Dr. N'TCHA M'PO Y.**, mon Maitre de mémoire pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses multiples occupations. Merci également pour ses conseils scientifiques et pour sa disponibilité tout au long de ce travail ;
- **Mr BODJRENOU René**, pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien scientifique et moral qui ont contribué à la finalisation de ce travail
- Tous mes aînés en hydrologie en particulier **Freddy HOUNONDAHO** pour tous leurs conseils et explications ;
- Tous mes camarades de l'INE pour l'ambiance et l'entraide qui ont régné tout au long de notre formation
- Enfin un sincère merci à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans la réalisation de ce travail.

## **Table des matières**

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>DEDICACE.....</b>                                | <b>1</b>  |
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>                           | <b>2</b>  |
| <b>Table des matières.....</b>                      | <b>3</b>  |
| <b>Listes des sigles et acronyme .....</b>          | <b>5</b>  |
| <b>Liste des figures .....</b>                      | <b>6</b>  |
| <b>Listes des tableaux.....</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>RESUME.....</b>                                  | <b>8</b>  |
| <b>CHAPITRE 1 : GENERALITE.....</b>                 | <b>10</b> |
| 1.1 Introduction .....                              | 10        |
| 1.2. Revue de littérature.....                      | 11        |
| 1.2.1. Clarification conceptuelle .....             | 11        |
| 1.2.2. Etat de connaissance .....                   | 12        |
| 1.3. Objectifs du mémoire .....                     | 13        |
| 1.3.1. Objectif général.....                        | 13        |
| 1.3.2. Objectifs spécifiques .....                  | 13        |
| 1.4. Questions de la recherche .....                | 14        |
| 1.5. Structure du mémoire .....                     | 14        |
| <b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES .....</b>      | <b>15</b> |
| 2.1. Milieu d'étude.....                            | 15        |
| 2.1.1. Localisation.....                            | 15        |
| 2.1.2. Relief, hydrographie et hydrologie .....     | 16        |
| 2.1.3. Contexte géologique et hydrogéologique ..... | 17        |
| 2.1.4. Climat.....                                  | 19        |
| 2.1.5. Végétation .....                             | 19        |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2. Données utilisées .....                                                                    | 20        |
| 2.2.1. Matériel .....                                                                           | 21        |
| 2.2.2. Méthodes.....                                                                            | 21        |
| <b>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>                                               | <b>29</b> |
| <b>RESULTATS .....</b>                                                                          | <b>29</b> |
| 3.1. Comparaison des indices de précipitations des modèles ERA5 et MERRA2 aux observations..... | 29        |
| 3.2. Analyse fréquentielle des pluies sur le bassin de Bétérou.....                             | 35        |
| 3.2.1. Comparaison des critères BIC et AIC.....                                                 | 35        |
| 3.2.2. Estimation des quantiles aux différentes périodes de retours .....                       | 36        |
| <b>DISCUSSION .....</b>                                                                         | <b>38</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE .....</b>                                                 | <b>39</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>                                                         | <b>40</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                             | <b>42</b> |

## Listes des sigles et acronyme

|                    |   |                                                                             |
|--------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>METEO BENIN</b> | : | Agence Nationale de la Météorologie du Bénin                                |
| <b>GIEC</b>        | : | Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'Evolution du Climat               |
| <b>INE</b>         | : | Institut National de l'Eau                                                  |
| <b>OMM</b>         | : | Organisation Météorologique Mondiale                                        |
| <b>RX1day</b>      | : | Maximum de précipitation journalière dans une année                         |
| <b>RX5day</b>      | : | Maximum de précipitations en cinq jours consécutifs dans une année          |
| <b>R1</b>          | : | Nombre total annuel de jours de pluie $\geq 1$ mm.                          |
| <b>R10</b>         | : | Nombre total annuel de jour de précipitations supérieures ou égales à 10 mm |
| <b>R20</b>         | : | Nombre total annuel de jour de précipitations supérieures ou égales à 20 mm |
| <b>PRCPTOT</b>     | : | Cumul total de pluies en une année                                          |
| <b>CCNUCC</b>      | : | Convention Cadre des Nations Unis sur les Changements Climatiques           |
| <b>OBS</b>         | : | Observation                                                                 |
| <b>ERA5</b>        | : | Ensemble de données météorologiques de 10km de révolution                   |
| <b>MERRA2</b>      | : | Ensemble de données météorologiques de 50km de révolution                   |

## Liste des figures

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1 :</b> Grands bassins hydrographiques du Bénin.....                                                                           | 15 |
| <b>Figure 2:</b> Bassin versant de l’Ouémé à Bétérou.....                                                                                | 16 |
| <b>Figure 3 :</b> Ensemble géologique du bassin versant de l’Ouémé à Bétérou.....                                                        | 18 |
| <b>Figure 4 :</b> Ensemble hydrogéologique du Bassin versant de l’Ouémé à Bétérou.....                                                   | 19 |
| <b>Figure 5:</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice R10 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou.....            | 29 |
| <b>Figure 6:</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice R20 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou.....            | 30 |
| <b>Figure 7:</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice RX1day sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou.....         | 31 |
| <b>Figure 8:</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice RX5day sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou.....         | 32 |
| <b>Figure 9:</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice <b>PRCPTOT</b> sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou..... | 33 |
| <b>Figure 10 :</b> Evolution interannuelle et tendancielle de l’indice R1 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou.....           | 34 |
| <b>Figure 11:</b> Valeurs des paramètres BIC et AIC .....                                                                                | 35 |
| <b>Figure 12 :</b> Diagramme des quantiles de pluie en fonction des périodes de retours associées. ....                                  | 36 |

## Listes des tableaux

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1:</b> Définition des indices .....                                                                                                            | 21 |
| <b>Tableau 2 :</b> Détermination des valeurs des critères RMSE et MAE .....                                                                               | 34 |
| <b>Tableau 3:</b> Valeurs minimales et maximales des quantiles d'ajustement pour les données d'observation et de réanalyses sur toutes les stations ..... | 36 |
| <b>Tableau 4 :</b> Critère d'appréciation des erreurs MAE et RMSE .....                                                                                   | 37 |

## **ABSTRACT**

West Africa in general, and Benin in particular, is one of the regions of the world most vulnerable to climate change. In Benin, the main climatic risks threatening the population are flooding and drought. For a better understanding of these phenomena, the availability of rainfall data is essential. The aim of this study is to assess the suitability of ERA5 and MERRA2 reanalysis data to replace observations in the Ouémé Basin at Bétérou for prediction purposes. Thus, rainfall data observed over the 1981-2016 period at three stations in the basin were compared with data from the two reanalyses ERA5 and MERRA2. The methodology adopted for the study consisted firstly in the comparative analysis of six characteristic rainfall indices, namely: R1, R10, R20, PRCPTOT, RX1day, RX5day both on ERA5 and MERRA2 and on observations. HYFRAN was then used to compare the daily precipitation frequencies of the two reanalyses with those of the observations. The results show that ERA5 simulates rainfall indices better than MERRA2, with low root-mean-square (RMSE) and mean-absolute errors (MAE) for ERA5 compared with the higher values obtained for MERRA2. The frequency analysis reveals that the GEV, lognormal and Gumbel distributions fit the observation data better, while the lognormal distribution fits the reanalysis data better. This suggests that, for climate change impact studies in the Ouémé basin at Bétérou, ERA5 reanalysis data could be used instead of observed data for stations with no data, but after bias correction.

## **RESUME**

L'Afrique de l'Ouest en général, et le Bénin en particulier est l'une des régions du monde les plus vulnérables aux changements climatiques. Au Bénin, les principaux risques climatiques qui menacent la population sont les inondations et la sécheresse. Pour une meilleure connaissance de ces phénomènes la disponibilité de données pluviométriques s'avère indispensable. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'aptitude des données de réanalyses ERA5 et MERRA2 à être utilisé en lieu et place des observations sur le Bassin de l'Ouémé à Bétérou. Ainsi, les données des précipitations observées sur la période de 1981-2016 sur trois stations du bassin ont été comparées aux données des deux réanalyses ERA5 et MERRA2. La méthodologie adoptée pour l'étude a consisté d'abord à l'analyse comparative de six indices caractéristiques de précipitations à savoir : R1, R10, R20, PRCPTOT, RX1day, RX5day autant sur ERA5 et MERRA2 que sur les observations. Ensuite, l'analyse comparée des fréquences de précipitations journalières des deux réanalyses et celle des observations a été réalisée avec HYFRAN. Les résultats témoignent que ERA5 simule mieux les indices de pluie que MERRA2

avec des erreurs quadratiques moyenne (RMSE) et absolue moyenne (MAE) faibles pour ERA5 comparativement aux valeurs obtenues pour MERRA2 qui sont plus élevées. L'analyse fréquentielle révèle que les lois GEV, Log-normale et Gumbel ajustent mieux les données d'observations tandis que celle log-normale ajuste mieux les données de réanalyses. Il en ressort que, pour les travaux d'étude d'impacts des changements climatiques dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou, les données de réanalyses ERA5 pourraient être utilisées en lieu et place des données observées, toutes fois nous recommandons de les corriger avant leurs exploitations.

# CHAPITRE 1 : GENERALITE

## 1.1 Introduction

Le climat change et c'est désormais notre monde qui est en danger. Les événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et les inondations sont de plus en plus fréquents et dégradent la qualité et la disponibilité en eau potable (IPCC, 2013). Ils rendent l'eau plus rare et imprévisible. Au cours des dernières décennies, les changements climatiques semblent être accélérés (GIEC, 2002 ; Trenberth et al., 2003, cité par Zaiem, 2012). Dans ces conditions, l'opinion publique s'interroge sur leurs causes et leurs devenir. Depuis plusieurs années, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude des extrêmes hydrométriques et leurs variabilités, au vu des conséquences parfois dramatiques que ces extrêmes hydrométriques peuvent entraîner, sur n'importe quelle région de la planète (N'Tcha, 2012 ; Lawin , 2007).

Ces phénomènes climatiques se répètent et engendrent des problèmes pour les populations touchées. Par exemple les inondations abiment les récoltes, les infrastructures socio-communautaires, les habitations et même engendrent parfois des pertes en vies humaines (Le Barbe *et al*, 2002) comme ce fut le cas en 2010 au Bénin avec plusieurs décès. Les conséquences des sécheresses sont aussi non moins négligeables notamment en termes de rendement agricoles, de manques de pâturages engendrant parfois conflits entre éleveurs et agriculteurs (Faye, 2015). L'insuffisance de données limite la caractérisation de ces événements extrêmes et par conséquent la prédiction de ces événements extrêmes. Ce problème de manque de données d'observation conduit aujourd'hui à la recherche d'alternative pour assurer la continuité des études hydrologiques dans les bassins de l'Afrique de l'Ouest (Obada 2017 ; N'Tcha M'Po, 2018 ; Badou, 2016). Dans les travaux précédemment cités, la capacité des modèles climatiques régionaux, notamment REMO, RACMO, CCLM, CRCM et HIRHAM, à simuler les précipitations au Bénin a été évaluée. Toutefois les sorties de ces modèles sont à des pas de temps journaliers bien que pour certaines études d'impact on a besoin des données à des pas de temps plus fins.

Les réanalyses ERA5 et MERRA2 sont des alternatives pour assurer la continuité des études hydrologiques de cette catégorie. Ces données ont l'avantage d'être à une forte résolution spatio-temporelle.

C'est dans ce contexte que la présente étude se propose d'évaluer l'aptitude des réanalyses ERA5 et MERRA2 à simuler des extrêmes de précipitations dans les milieux tropicaux et principalement sur le bassin de Bétérou.

## 1.2. Revue de littérature

### 1.2.1. Clarification conceptuelle

**Stationnarité** : Une série chronologique est dite stationnaire si ses propriétés sont invariantes dans le temps. La littérature hydrologique s'intéresse plus particulièrement à deux formes de non-stationnarité, les tendances et les ruptures (Lemaitre 2002, cité par Koukponou, 2016). Dans leur document sur les tests de stationnarité, Faucher et al. (1997) considère qu'une série de données est dite stationnaire lorsque l'on ne retrouve pas de variations temporelles significatives autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement.

**Extrêmes** : Goubanova et Li (2007), qualifie d'« extrêmes », les différents types d'événements climatiques susceptibles de présenter des écarts importants à la normale climatologique. Se basant sur la définition du climat, Beniston et Stephenson (2004) déclarent que la notion d'extrême est très complexe et se réfère à l'éloignement de la valeur d'une variable météorologique, ou à une combinaison de ces dernières, par rapport à leurs valeurs moyennes en un lieu et en un moment donné.

La définition appropriée ne peut être choisie qu'en fonction du contexte dans lequel se situe l'étude. Pour Beniston et al. (2007) ; diaz del Olmo et al. (2009), l'extrême peut être basé sur la rareté d'un phénomène climatique en considérant sa fréquence d'occurrence d'une part et sur l'intensité du phénomène. D'autre part tout en impliquant la considération des dépassements d'un seuil par les variables climatiques associées à ce phénomène.

Enfin, la définition d'« extrême » peut faire appel à la notion d'impact et s'appuyer sur des dégâts socioéconomiques causés par ce phénomène. D'après IPCC (2007), un événement météorologique extrême est un événement rare en un lieu et à une époque de l'année. Quand il se prolonge par exemple sur une saison, il peut être qualifié d'événement climatique extrême. Selon Decamps (2010), il s'agit d'un événement exceptionnel révélé par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (température, pluie, ...) sur un territoire donné.

Concernant les événements hydrologiques extrêmes, ce sont essentiellement les crues des cours d'eau suivies des inondations des plaines après un excédent pluviométrique ou des étiages à la suite de sécheresse pluviométrique. Selon l'OMM (2006) et Vissin (2007), les crues fluviales surviennent lorsque le volume d'encaissement du cours d'eau est dépassé et déborde dans la plaine d'inondation en raison des pluies torrentielles dans les secteurs notamment en amont du

cours d'eau. Leur avènement est parfois favorisé par les formes d'occupation du sol et les variations saisonnières de la végétation (Donou, 2015).

**Changement climatique :** Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le changement climatique est un changement du climat attribué directement ou indirectement à toute activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère de la Terre et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes de temps comparables. Selon, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique se réfère à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistant sur une longue période de temps (décades ou plus). Le changement climatique peut être dû aux processus naturels internes ou à des forçages exogènes ou à des changements anthropogéniques persistants dans l'atmosphère ou dans les usages du sol. La question de la ressource en eau est l'une des priorités en termes d'impacts et d'adaptation liés au changement climatique. Il est crucial d'avoir un accès fiable à l'eau

### 1.2.2. Etat de connaissance

Les réanalyses ERA5 et MERRA2 ont été utilisées. Les variables utilisées dans ce travail sont celles relatives à la pluie.

#### ➤ Les réanalyses ERA5

Les données ERA sont des réanalyses de l'atmosphère globale et des conditions de surface (Hounguè et al., 2018). ERA 5 remplace les réanalyses ERA-Interim qui ont cessé d'être produites depuis le 31 août 2019. Ces données constituent un mélange de données réelles et de données de modélisation fusionnées sur une période de 40 à 50 ans environ. Le principe des réanalyses pour les phénomènes repose sur la recombinaison du paramètre étudié par le modèle IFS (Integrated Forecasting System) du Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) (Hounguè et al., 2018). ERA 5 combine de vastes quantités d'observations historiques en estimation mondiale à l'aide de systèmes avancés de modélisation et d'assimilation de données. ERA5 fournit des estimations horaires d'un grand nombre de variables climatiques atmosphérique terrestres et océaniques (environ 154 variables en sortie). Les données sont stockées au format GRIB. Les données couvrent la terre sur une grille de 30km et résolvent l'atmosphères en utilisant

137 niveaux de la surface jusqu'à une hauteur de 80km. ERA5 comprend des informations sur les incertitudes pour toutes les variables à des résolutions spatiales et temporelles réduites. Sa résolution spatiale est de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  (en latitude et en longitude) équivalent à 10Km environ.

### ➤ **Les sorties MERRA2**

La deuxième réanalyse rétrospective de l'ère moderne pour la recherche et les applications (MERRA-2) est une Réanalyse atmosphérique de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) qui commence en 1980. Elle remplace la réanalyse originale MERRA (*Rienecker et al., 2011*) en utilisant une version améliorée du système d'observation de la Terre Goddard Modèle, version 5 (GEOS-5) du système d'assimilation de données. MERRA-2 inclut des mises à jour du modèle (*Molod et al., 2012 ; 2014*) et au schéma d'analyse Global Statistical Interpolation (GSI) de Wu et al. (2002). La principale motivation pour le remplacement de MERRA par MERRA-2 est le fait que l'assimilation de données du système MERRA a été gelé en 2008 et n'est pas capable d'ingérer plusieurs nouveaux types de données importants : comme les instruments satellites plus anciens, et de plus, le nombre d'observations disponibles pour l'assimilation dans MERRA diminue rapidement. MERRA-2 utilise GEOS-5, version 5.12.4, qui est capable d'utiliser les nouveaux sondeurs à micro-ondes et les instruments à rayonnement infrarouge hyperspectral, ainsi que d'autres types de données.

Contrairement à MERRA, toutes les collectes de données de MERRA-2 sont fournies sur une grille régulière  $0,625^\circ \times 0,5^\circ$  (en longitude et en latitude) au plan horizontal. Cette grille comporte 576 points dans le sens longitudinal et 361 points dans le sens latitudinal.

## **1.3. Objectifs du mémoire**

### **1.3.1. Objectif général**

L'objectif général de notre étude est d'évaluer l'aptitude des modèles ERA5 et MERRA2 à simuler les pluies extrêmes sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

### **1.3.2. Objectifs spécifiques**

L'objectif principal sera atteint à travers les objectifs spécifiques suivants :

- Comparer les indices des précipitations des réanalyses ERA5 et MERRA2 aux indices des observations.
- Identifier la loi statistique qui s'ajuste le mieux aux pluies extrêmes du bassin de l'Ouémé à Bétérou.

- Comparer les quantiles de précipitations maximales annuelles obtenus sur les données d'observations de l'Ouémé à Bétérou d'une part et à celle de ERA5 et MERRA2 d'autre part.

#### **1.4. Questions de la recherche**

- Les indices de précipitation des réanalyses sont-ils proches des indices de précipitations déterminées sur les données d'observations ?
- Les quantiles de précipitations des réanalyses sont-ils proches de ceux obtenus grâce aux observations ?

#### **1.5. Structure du mémoire**

Notre étude a été structurée en quatre (03) chapitres : Le premier chapitre est le présent chapitre intitulé « généralités », le deuxième chapitre présente es différents résultats et discussions et le troisièmes et dernier chapitre présente la conclusion qui se dégage de cette étude.

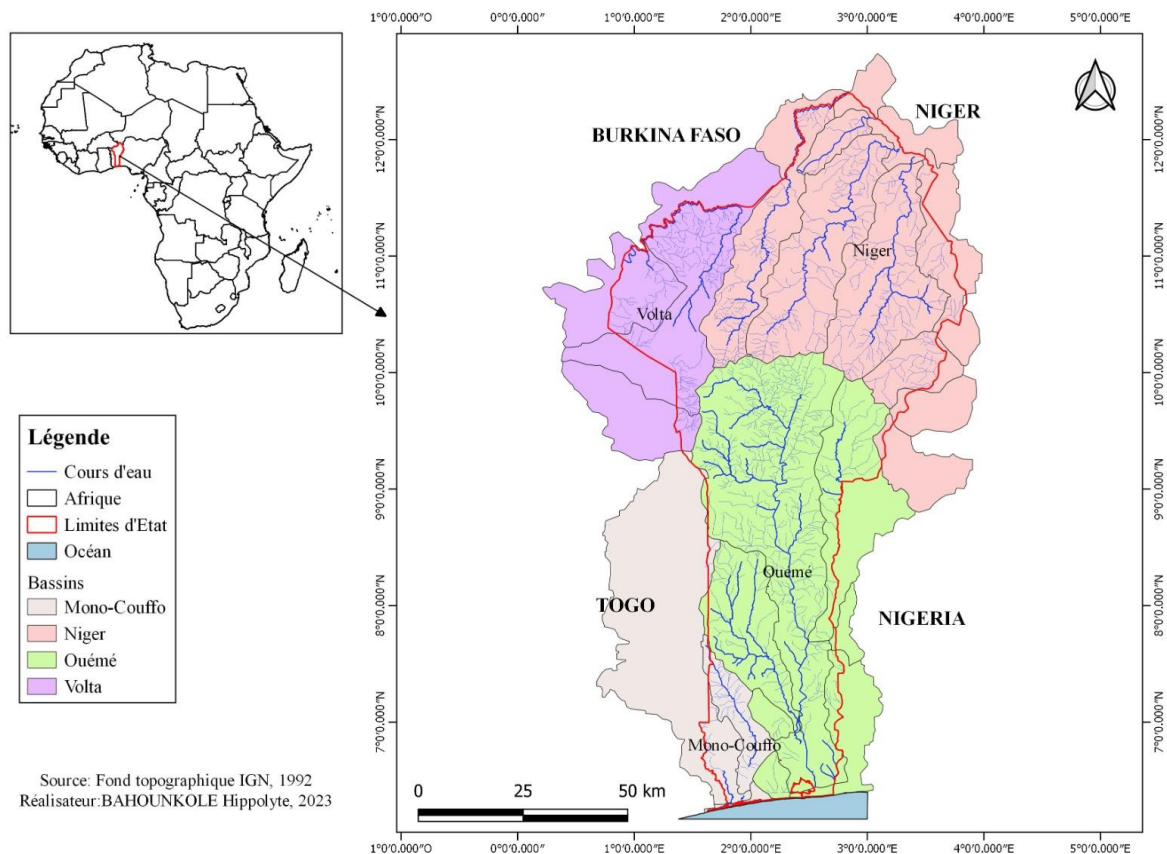
## CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Milieu d'étude

Dans ce chapitre, nous présentons le milieu d'étude c'est-à-dire sa situation géographique, relief, hydrographique, hydrogéologie, son climat et sa végétation. Nous présenterons ensuite les données et la méthodologie utilisée pour l'atteinte des objectifs de la présente étude.

#### 2.1.1. Localisation

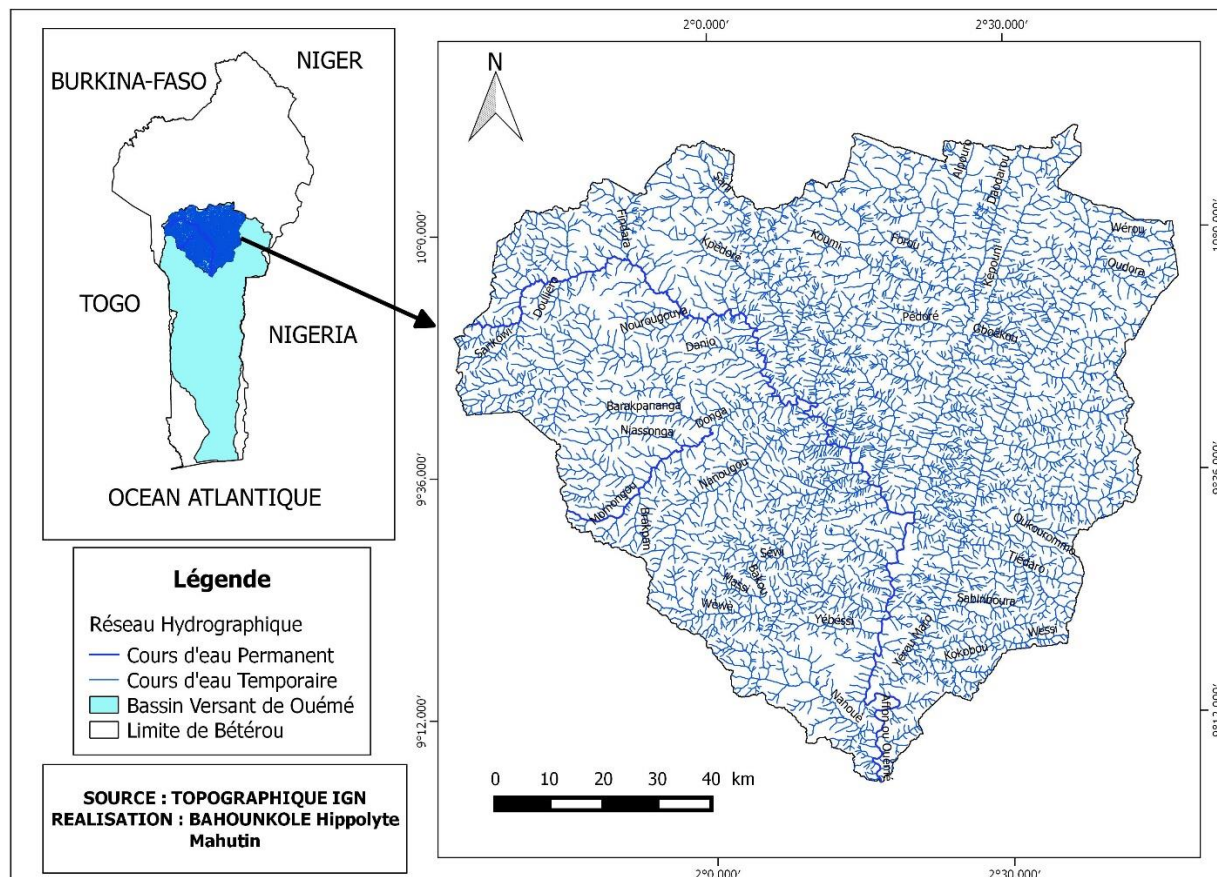
Le Bénin est divisé en quatre grands bassins hydrographiques. Il s'agit des bassins du Niger, de la volta, du Mono-Couffo, et de l'Ouémé qui est le plus grand bassin du Bénin. La figure 1, présente les grands bassins hydrographiques du Bénin (Figure1).



**Figure 1 :** Grands bassins hydrographiques du Bénin

Le bassin versant de l'Ouémé couvre une superficie de 46 500 km<sup>2</sup>, soit environ 41% de la superficie du pays. Ce bassin est subdivisé en plusieurs sous-bassins versants dont le bassin de Bétérou qui est la zone de la présente étude.

Le bassin de l’Ouémé à Bétérou est situé au nord du Bénin et est partagé par trois départements administratifs (Borgou, Donga et Atacora). Il est situé entre les parallèles 9°12’ et 10°12’ de latitude Nord, d’une part, et les méridiens 1°30’ et 3° de longitude Est, d’autre part (Figure 2). Sa superficie est évaluée à 10 083 km<sup>2</sup> (Le Barbé et al. 1993).



**Figure 2:** Bassin versant de l’Ouémé à Bétérou

Dix communes partagent le bassin de l’Ouémé à Bétérou. La population totale des 10 communes du bassin est estimée à plus de 1 482 270 habitants (INSAE, 2015) en 2013 (soit 14,8 % de la population nationale). L’agriculture demeure la principale activité dans le bassin de l’Ouémé à Bétérou. Elle occupe plus de 80 % de la population active (Zannou 2011). La pression humaine sur les terres du fait de la croissance démographique entraîne une forte dégradation du milieu naturel (N’Tcha M’Po ,2018).

### 2.1.2. Relief, hydrographie et hydrologie

L’Ouémé à Bétérou suit une direction d’écoulement du nord-ouest vers le sud-est. Situé en tête de bassin, ses pentes locales sont très élevées et restent toujours globalement fortes (1 à 2 m/km)

(Le Barbé et al. 1993). Les altitudes du bassin sont comprises entre 617 m à l'amont (Ouest) et 241 m à l'exutoire (Sud). Sur le parcours amont où il porte le nom Affon et draine 4 320 km<sup>2</sup>, l'Ouémé monte d'abord vers le nord sur environ 50 km, puis descend vers le sud-est sur 100 km à la confluence avec l'Alpouro (Le Barbé et al. 1993).

Son parcours aval entre cette confluence et la station hydrométrique de Bétérou est long de 45 km dans le sens nord-sud (Le Barbé et al. 1993). Le réseau hydrographique de l'Ouémé à Bétérou peut être décrit en deux entités (Figure2) dont la description suivante est essentiellement tirée de (Le Barbé et al. (1993)

- le réseau rive gauche situé à l'Est de l'axe nord-sud : les rivières suivent ici la direction nord-sud imposée par les formations du socle. D'amont en aval, on peut citer deux affluents : l'Alpouro long de 86 km pour une superficie drainée de 2010 km<sup>2</sup> et le Yérou-Marou long de 120 km et drainant 2590 km<sup>2</sup> ;
- le réseau rive droite situé vers l'Ouest composé des affluents suivants : la Donga (74 km et 1285 km<sup>2</sup>) et la Wéwé (49 km et 617 km<sup>2</sup>).

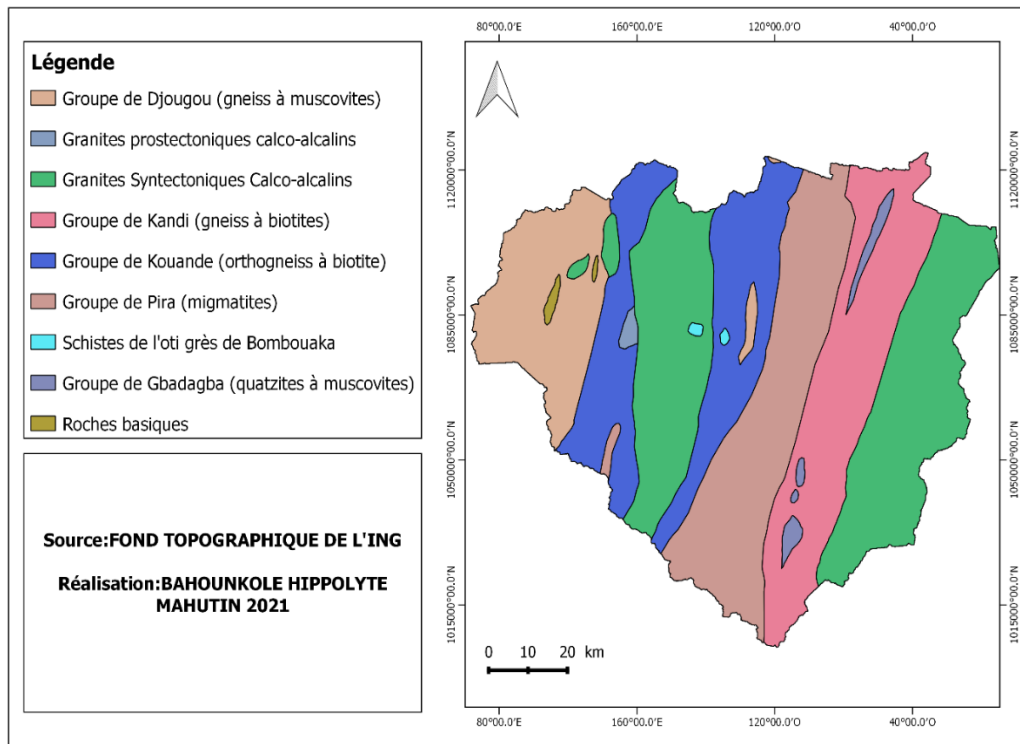
Le réseau hydrographique est dense mais plusieurs rivières du bassin présentent un régime d'intermittence caractérisée par un assèchement en saison sèche et une reprise des écoulements en saison pluvieuse. Le fleuve Ouémé à Bétérou présente généralement un pic entre août et septembre. Mais des pics sporadiques peuvent s'observer en juillet selon la saison des pluies de l'année. Le maximum journalier atteint parfois 620 m<sup>3</sup>/s (en septembre 2013) mais le cours d'eau tarie généralement entre les mois de février et mars (N'Tcha, 2018).

### **2.1.3. Contexte géologique et hydrogéologique**

Le Bénin repose largement sur un socle cristallin du Précambrien connu sous le nom de Dahoméen ou bouclier bénino-nigérien et dont 20 % des terres béninoises restantes sont occupées par des bassins sédimentaires (Judex *et al.*, 2009). La structure géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou est essentiellement constituée des granites, des migmatites, des intrusions basiques et du gneiss socle Dahoméen.

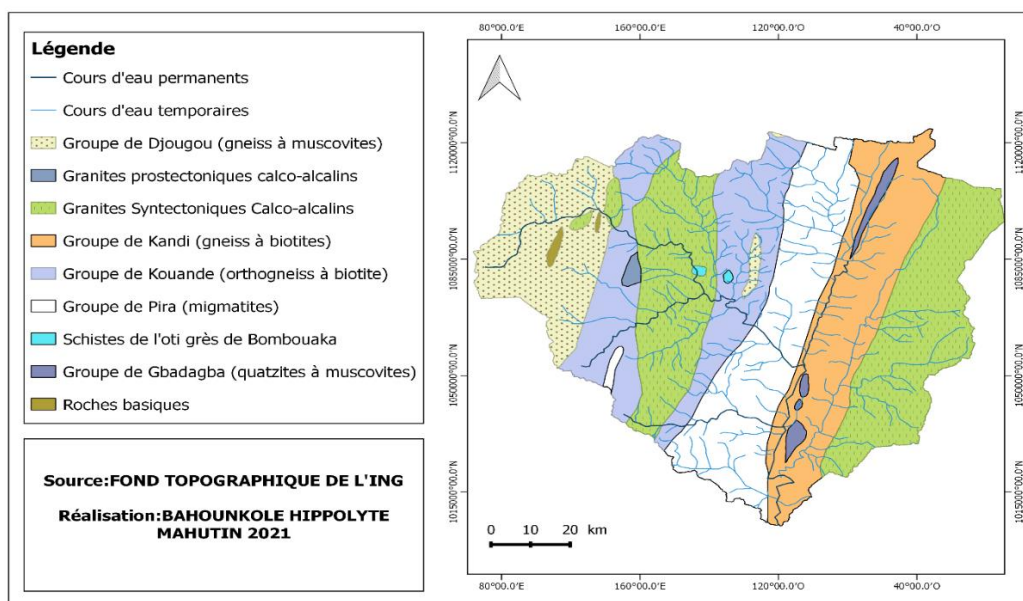
Les formations hydrogéologiques du bassin supérieur de l'Ouémé sont constituées de deux types de nappes d'eau souterraine (Zannou, 2011). Les premiers réservoirs supérieurs d'altérites se situent dans la zone d'altération sablo-argileuse avec une épaisseur généralement de l'ordre de 10 à 30 m. Leur perméabilité est très faible et généralement de l'ordre de  $8 \times 10^{-6}$  m/s (Vouillamoz *et al.* 2014). Les seconds réservoirs inférieurs de fissures et de fractures sont situés au-dessus des roches saines et sont caractérisés par une zone intensément fissurée et altérée vers

le haut avec des fissures et diaclases à pendage variable (Vouillamoz *et al.* 2014). Ceux-ci présentent une épaisseur estimée entre 40 m et 50 m dans les formations cristallines et métamorphiques.



**Figure 3 :** Ensemble géologique du bassin versant de l’Ouémé à Bétérou

La zone d’étude se situe sur le socle cristallin qui ne renfermerait donc pas d’aquifère continu du fait de l’absence de porosité d’interstice. Ces roches sont quasiment imperméables si elles ne sont pas fissurées ou altérées. Mais suite à l’altération du substratum, un réservoir sous-jacent se développe et contient la nappe des altérite (Kamagaté 2006).



**Figure 4 :** Ensemble hydrogéologique du Bassin versant de l’Ouémé à Bétérou

#### 2.1.4. Climat

Le climat du bassin de l’Ouémé à Bétérou est soumis à l’influence du climat sub-soudanien qui est un climat unimodal caractérisé par une saison humide qui compte six à sept mois de l’année, d’avril à octobre et une saison sèche de Novembre à Mars. L’alternance de la saison des pluies et de la saison sèche a une grande influence sur les autres éléments climatiques, tels que la température de l’air, l’humidité, les vents et l’évaporation.

Les températures dans cette zone correspondent à celle relevées aux stations synoptiques de Parakou et de Natitingou. Sur la période 1960 à 2016, les températures minimales varient entre 11.3 et 29.2°C à Natitingou, 12.6 et 27.1°C à Parakou ; les températures maximales, quant à elles, varient entre 44.7 et 21.7°C à Natitingou, 41.6 et 21.8°C à Parakou.

La puissance de l’harmattan dans le nord du pays, a un grand effet sur l’humidité de la zone d’étude qui se remarque beaucoup plus en saison pluvieuse.

#### 2.1.5. Végétation

Le bassin de l’Ouémé à Bétérou se trouve dans la zone continentale sèche (Zannou, 2011). La végétation naturelle se caractérise par des savanes arborées ou boisées avec la présence de forêts classées et de forêts galeries le long des principales rivières ainsi que de savane arborée et arbustives.

Les types de végétation dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou peuvent être classés en sept principaux types. Il s'agit des forêts galeries, forêts denses, forêts claires et les savanes boisées, arborées, arbustives et herbeuses (Hiepe, 2008 ; Thamm *et al.*, 2008 ; Bel, 2010). Du fait de l'anthropisation agro-pastorale croissante de la zone (Judex M *et al.*, 2009), les forêts sont de plus en plus défrichées (par brulis) au profit de culture de rente (coton et anacarde) ou culture vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, mil et riz).

## 2.2. Données utilisées

Les données utilisées pour l'atteinte de nos objectifs sont entre autres :

- les hauteurs de pluie journalières de trois stations qui sont situées à l'intérieur et au voisinage du bassin l'Ouémé à Bétérou. Elles sont obtenues à météo Bénin pour la période de 1981 à 2016.
- les données de réanalyses qui ont été téléchargées pour la même période sur : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land>  
[https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/ME\\_RRA-2/data\\_access/](https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/ME_RRA-2/data_access/).

Le comblement des données manquantes a été fait à l'aide de l'interpolation pondérée par l'inverse de la distance.

Dans cette méthode, la valeur à estimer en un point de la zone d'étude est déterminée à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs les plus proches du point considéré. Elle consiste à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance entre les sites et le point estimé à une certaine puissance. Elle se formule de la manière suivante :

$$P_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} * P_i \quad (1)$$

$$\omega_{ij} = \frac{1/d_{ij}^2}{\sum_{i=1}^n (1/d_{ij}^2)} \quad (2)$$

Avec :

$\omega_{ij}$  : Paramètres liés aux inverses des distances h entre les points i et j

$P_j$  : Pluies interpolées au point j

$P_i$  : Pluies observées au point i

$d_{ij}$  : distance entre les points i et j

### 2.2.1. Matériel

Le matériel utilisé pour cette étude est composé entre autres :

- du logiciel QGIS pour la réalisation des cartes (carte géologique, carte hydrographique...etc.) ;
- du logiciel HYFRAN pour l'analyse fréquentielle
- Le logiciels R a été utilisé pour l'obtention des indices à partir du package Rclimindex

### 2.2.2. Méthodes

Pour comparer les données réanalyses ERA5 et MERRA2 aux données observations, six indices de précipitation définis par l'OMM ont été utilisés à cause de de la portée des résultats ex cotées de cette étude et de la modélisation des extrêmes (hautes eaux). (Tableau1).

**Tableau 1:** Définition des indices

| Catégorie            | Acronymes     | Noms de l'indice                                        | Descriptions                                                   | Unités |
|----------------------|---------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Indices d' intensité | <b>Rx1day</b> | Maximum de précipitation journalière par an             | Maximum de précipitations journalières dans une année          | Mm     |
|                      | <b>Rx5day</b> | Maximum de précipitations en 5 jours consécutifs par an | Maximum de précipitation en 5 jours consécutifs dans une année | Mm     |
|                      | <b>PRCPT</b>  | Indice de cumul de pluie en une année                   | Cumul total de pluies en une année                             | Mm     |
| Indice de fréquences | <b>R1</b>     | Nombre de jours de pluies en une année                  | Nombre total annuel de jours de pluie $\geq 1$ mm              | Jours  |
|                      | <b>R20</b>    | Séquences de jours de pluies consécutifs                | Maximum de séquence humide en jours consécutifs dans une année | Jours  |
|                      | <b>R10</b>    | Nombre de jours de pluie intense                        | Nombre total annuel de jours de pluie $\geq 10$ mm             | Jours  |

#### 2.2.2.1. Analyse fréquentielle des pluies

L'analyse fréquentielle permet de caractériser l'ampleur des événements extrêmes enregistrés afin d'en définir les probabilités d'occurrence. Elle est l'un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes. C'est une méthode statistique de prédiction consistant à

étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (climatologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel, auquel est associé une période de retour  $T$  (quantile de période de retour  $T$  ou de probabilité au dépassement  $p = 1/T$ ).

L'estimation de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité  $F(x; \theta)$  à un échantillon de  $n$  observations  $\{x_1, \dots, x_n\}$  où  $\theta$  représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité  $F$ . Pour estimer la probabilité d'apparition d'une variable pluviométrique, on dispose de séries sur une période d'observation. L'événement pluviométrique observé doit être échantillonné pour sélectionner les valeurs maximales (précipitation maximales journalières). L'événement ainsi échantillonné est ajusté à une loi de probabilité. On peut ainsi définir :

- la fonction de répartition  $F_Q(q)$ , qui correspond à la probabilité que la variable  $Q$  prenne une valeur inférieure à  $q$  c'est-à-dire :  $F_Q(q) = P[Q \leq q]$
- la fonction de densité de probabilité  $f_Q(q)$  ; qui est une représentation de la probabilité d'apparition d'une hauteur de pluie  $q$  élémentaire :  $f_Q(q) = P[q \leq Q < q + dq]$ . Où  $dq$  : variation élémentaire de  $Q$ .

La probabilité de non occurrence d'une hauteur de pluie supérieure à  $q$  est :

$$F(Q) = P[Q \leq q] = \int_0^q f_Q(q) dq \quad (3)$$

Pour définir la probabilité d'apparition d'une hauteur de pluie, les étapes à suivre sont :

- échantillonnage de la série de précipitations ;
- vérification des hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ;
- choix d'une loi statistique ;
- contrôle de l'ajustement ;
- analyse des incertitudes ;

#### ❖ Echantillonnage de hauteur de pluie maximale.

L'échantillonnage consiste à sélectionner les hauteurs de pluie les plus fortes de la série. Deux méthodes existent à cet effet, les valeurs maximales annuelles (M.A) et les valeurs supérieures à un seuil (S.S.)

### ❖ Identification des Valeurs maximales (valeur record)

Cette méthode consiste à sélectionner la hauteur de pluie maximale de chaque année. Elle utilise l'année comme durée de regroupement car elle représente, à travers toutes les saisons, l'ensemble des phénomènes physiques qui gouvernent la pluviométrie (Valencia ; 2006).

### ❖ Vérification des hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité

- **Indépendance** : ce test consiste à vérifier l'absence d'auto corrélation entre les hauteurs de pluie. Ce test est particulièrement important lorsque l'échantillonnage se fait à partir des valeurs supérieures à un seuil car il est alors probable que deux hauteurs de pluies consécutives soient dépendantes.
- Etant donné un échantillon de taille  $n$  ( $X_1, \dots, X_n$ ), le test de Wald-Wolfowitz considère la variable statistique  $R$  telle que :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} X_i X_{i+1} + X_1 X_n \quad (4)$$

Lorsque les éléments de l'échantillon sont indépendants,  $R$  suit asymptotiquement une distribution normale dont la moyenne et la variance peuvent être déduites des équations

$$\text{suivantes :} \quad \bar{R} = \frac{s_2^2 - s_4}{N-1} - \bar{R}^2 + \frac{s_1^4 - 4s_1^2 s_2^2 + 4s_1 s_3^2 + s_2^4 - 2s_4}{(N-1)(N-2)} \quad (5)$$

Où  $sr = Nm^r$ ,  $m^r$  étant le  $r$  ième moment de l'échantillon autour de l'origine.

La quantité  $(R - \bar{R}) / \text{var}(R)^{1/2}$  suit une distribution normale standardisée (de moyenne 0 et de variance 1) et peut être utilisée pour tester au niveau  $\alpha$  l'hypothèse d'indépendance en comparant  $|n|$  avec la variable normale standard  $u_{\alpha/2}$  correspondant à la probabilité de dépassement  $\alpha/2$ .

- **Homogénéité et stationnarité** : il s'agit de vérifier que toutes les observations proviennent des mêmes conditions de fréquence- s et du même phénomène, par exemple que toutes les fréquences soient associées à la pluie et non à la fonte de neige. Ces hypothèses peuvent être examinées à l'aide de tests statistiques.

Plusieurs tests statistiques sont utilisés pour s'assurer de l'homogénéité d'une série statistique. Nous retenons pour notre étude le test de Wilcoxon. Le test de stationnarité utilisée est celui de Kendall.

C'est un test non paramétrique qui utilise la série des rangs des observations, au lieu de la série de leurs valeurs. Le test de Wilcoxon se base sur le principe suivant :

Si l'échantillon X est issu d'une même population Y, l'échantillon  $X \cup Y$  (union de X et de Y) en est également issu.

On procède ainsi :

- Soit une série d'observations de longueur N à partir de laquelle on tire deux échantillons X et Y :  $N_1$  et  $N_2$  sont respectivement les tailles de ces échantillons, avec

$$N = N_1 + N_2 \text{ et } N_1 \leq N_2$$

On classe ensuite les valeurs de notre série par ordre croissant. Par la suite, nous ne nous intéresserons qu'au rang de chacun des éléments des deux échantillons dans cette série, si une valeur se répète plusieurs fois, on lui associe le rang moyen correspondant.

On calcul ensuite la somme  $W_x$  des rangs des éléments du premier échantillon dans la série commune :

$$W_x = \sum RangX \quad (6)$$

Wilcoxon a montré que, dans le cas où les deux échantillons X et Y constituent une série homogène, la quantité  $W_x$  est comprise entre deux bornes  $W_{max}$  et  $W_{min}$  données par

les formules suivantes :

$$W_{min} = \frac{(N_1 + N_2)(N_1 - 1)}{2} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \quad (7)$$

$$W_{max} = (N_1 + N_2 + 1) \cdot N_1 - W_{min} \quad (8)$$

: représente la valeur de la variable centrée réduite de la loi normale correspondant à  $1 - \frac{\alpha}{2}$  (au seuil de confiance de 95% nous avons  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1.96$  (Sari A., 2002). La série est homogène si la condition  $W_{min} < W_x < W_{max}$  est vérifiée.

#### ❖ Choix d'une loi statistique

L'ajustement d'une loi statistique à la série de hauteurs de pluie ( $q_1 ; q_2 ; \dots ; q_N$ ) permet de prévoir la probabilité d'apparition d'une hauteur d'une précipitation à partir de la fonction de répartition. Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées. Celle utilisée dans cette étude est la formule de Harzen (1978) :

$$F(i) = \frac{i - 0.5}{n} \quad (9)$$

Où  $k$  est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée),  $n$  est la taille de l'échantillon et  $a=0,4$  (constante de la formule de Cunnane).

- A l'aide du modèle théorique fourni par la loi statistique ajustée, on procède à l'extrapolation qui permet d'obtenir les valeurs des quantiles (valeur de  $X_r$  pour une période de retour  $T$ ). La relation entre la probabilité au non dépassement et la période de retour est :

$$T = \frac{1}{1-q} \quad (10)$$

#### ❖ Choix du modèle fréquentiel

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Ce choix dépend de la vitesse à laquelle la probabilité des grandes valeurs évolue. Plusieurs lois statistiques sont utilisées en analyse fréquentielle. Parmi celles-ci, seulement quatre ont été utilisées pour la caractérisation des risques pluviométriques.

- **Loi de Gumbel**

Le modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle) (Meylan et Musy, 1999). La fonction de répartition de la loi de Gumbel  $F(x)$  s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{X - X_0}{S} \right) \right] \quad (11)$$

$S$  : paramètre d'échelle

$X_0$  : paramètre de position

- **Loi Log-normale**

La loi Log-normale est utilisée dans de nombreux domaines. En hydrologie on l'utilise pour modéliser les lames d'eau écoulées ou précipitées en climats méditerranéens, arides et semi-arides (régimes irréguliers). Elle est également utilisée pour les débits de pointe et les courbes intensité-durée de précipitations.

La fonction de répartition de la loi log-normal est le suivant :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz \quad (12)$$

Avec : 
$$Z = \frac{\log Xi - \log X_{moy}}{\sigma(\log X)}$$

- **GEV**

La loi des extrêmes généralisée (GEV) représente dans le contexte asymptotique, la distribution du maximum de n variables aléatoires. Elle est une loi à trois paramètres représentés comme une généralisation de la loi de Gumbel. La densité de probabilité est donnée par :

$$F(x) = e^{-\left[1 - \frac{k(X - X_0)^{1/k}}{S}\right]} \quad (13)$$

Où  $X_0 + \frac{s}{k} \leq x < \infty$  pour  $k < 0$

–  $-\infty < x < +\infty$  pour  $k = 0$

–  $-\infty < x \leq X_0 + \frac{s}{k}$  pour  $k > 0$

$X_0$  : paramètre de position

$S$  : paramètre d'échelle

$K$  : Paramètre de forme

Elle est régulièrement utilisée pour l'analyse fréquentielle des volumes correspondant aux pluies maximales annuelles. Son intérêt majeur est une grande flexibilité de forme, qui en fait un outil susceptible de s'adapter à des histogrammes très variés. Cette méthode donne des estimateurs corrects et efficaces (Laborde, 2000 ; Soro et al., 2008).

- **Loi Pearson III**

La forme standardisée de la loi Pearson III est une transformation linéaire de la fonction gamma, La densité de probabilité de Pearson III est donné par :

$$F(t) = K \int_t^{\infty} e^{\lambda t} (X + \sqrt{\lambda})^{\lambda-t} dt \quad (14)$$

$$K = \frac{e^{-\lambda} \sqrt{\lambda}}{\gamma(\lambda)} \quad (15)$$

où  $\lambda$  : Paramètre de forme

$\gamma(\lambda)$  : Fonction gamma

$t$  est la variable réduite ayant pour expression :

$$t = \frac{Xi - Xmoy}{\sigma} = \frac{Ki - 1}{Cv} \text{ avec } Ki = \frac{Xi}{Xmoy} \quad (16)$$

$\sigma$  : écart- type

$Ki$  : Hydraulicité

$moy$  : moyenne arithmétique de la série

Le temps de retour  $T$  d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit :

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (17)$$

#### ❖ Ajustement du modèle fréquentiel

La technique d'ajustement utilisée est la méthode graphique. Cette méthode repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite. En conséquence, les points de la série à ajuster sont reportés dans un système d'axes ( $x$  ;  $y$ ). A partir de ce système d'axes, il a été alors possible de tracer la droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres  $a$  et  $b$  définissant la loi.

#### 2.2.2.2. Critères de comparaison des lois :

Le meilleur modèle sera choisi sur la base de la comparaison numérique avec les critères Bayésien et d'Akaike. Ces deux critères permettent de choisir la loi, la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La

distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée.

- Critère d'information Bayésien (BIC)

En statistique, le critère d'information bayésien (BIC) ou critère de Schwarz (1978) est un critère destiné à la sélection du meilleur modèle (parmi un ensemble de modèles) d'ajustement de séries de données (Meddi et al., 2013). Il se note :

$$BIC = -2 \log(L) + 2\log(N) \quad (18)$$

Où :

L : la vraisemblance (la vraisemblance d'un échantillon est définie comme la probabilité de l'observer, c'est le produit des densités de probabilité des différentes valeurs (Djerboua, 2001))

K : le nombre de paramètres,

N : la taille de l'échantillon.

- Critère d'information d'Akaike (AIC)

Le critère d'information d'Akaike mesure la qualité de l'ajustement d'un modèle statistique. Il a été développé par Hirotugu Akaike en 1974 (Meddi et al., 2013). L'expression de ce critère est la suivante :

$$AIC = -2 \log(L) - 2K \quad (19)$$

Avec :

L : la vraisemblance

K : nombre de paramètres

## CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### RESULTATS

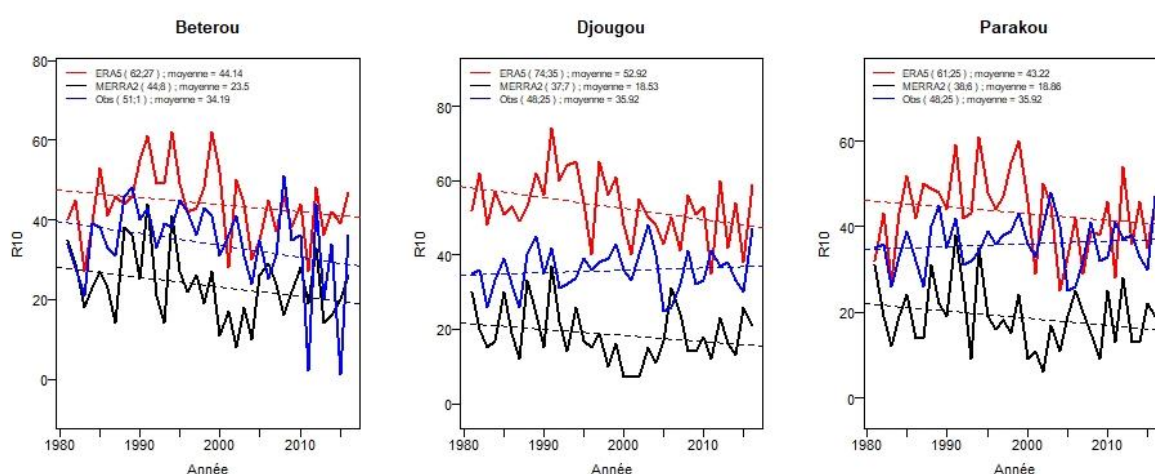
Le présent chapitre présente les résultats de l'évaluation issus de l'application de la méthodologie énoncée dans le chapitre précédent. Cette évaluation est faite en comparant les indices de précipitations des observations aux réanalyses ERA5 et MERRA2 à l'aide d'une analyse de graphes montrant l'évolution des indices au cours des années. D'autre part, l'analyse fréquentielle a permis d'identifier la meilleure loi statistique pour l'estimation des quantiles de pluie.

#### 3.1. Comparaison des indices de précipitations des réanalyses ERA5 et MERRA2 aux observations.

Avant tout, nous notifions que pour la présente étude trois stations du bassin de l'Ouémé à Bétérou ont été considérées à cause des lacunes, des erreurs d'observations. Les stations de Parakou, Djougou et Bétérou ont été prises parce qu'elles présentent moins de 5% de lacune et ont beaucoup plus d'années complètes de données.

- **Analyse comparative des indices de précipitation des réanalyses ERA5 et MERRA2 aux observations.**

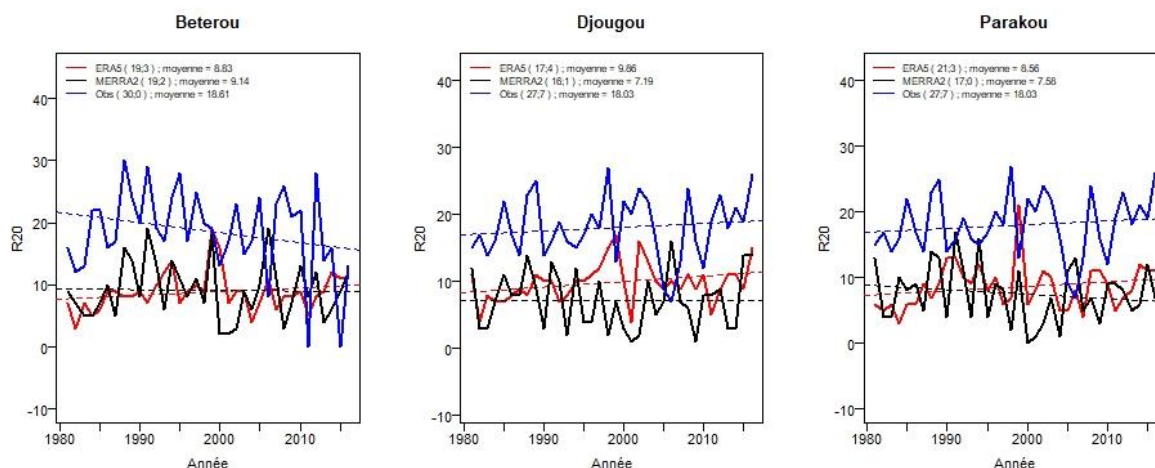
#### - R10



**Figure 5:** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice R10 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou

La figure 5 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice R10 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 5, il ressort que l'indice R10 varie généralement entre 1 et 51 pour les observations, 25 et 74 pour ERA5 et 6 et 44 pour MERRRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 34, 24 ,44 à la station de Bétérou, 36, 19, 63 à Djougou et 36, 19, 43 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que MERRA2 sous-estime les observations tandis que ERA5 les surestime. En ce qui concerne l'évolution tendancielle , R10 évolue de manière décroissante au cours des années pour les données de réanalyses et décroissante pour les observations à bétérou, mais croissante à djougou et à parakou. On en déduit que R10 décroît avec le temps pour les réanalyses ainsi que les observations.

## -R20

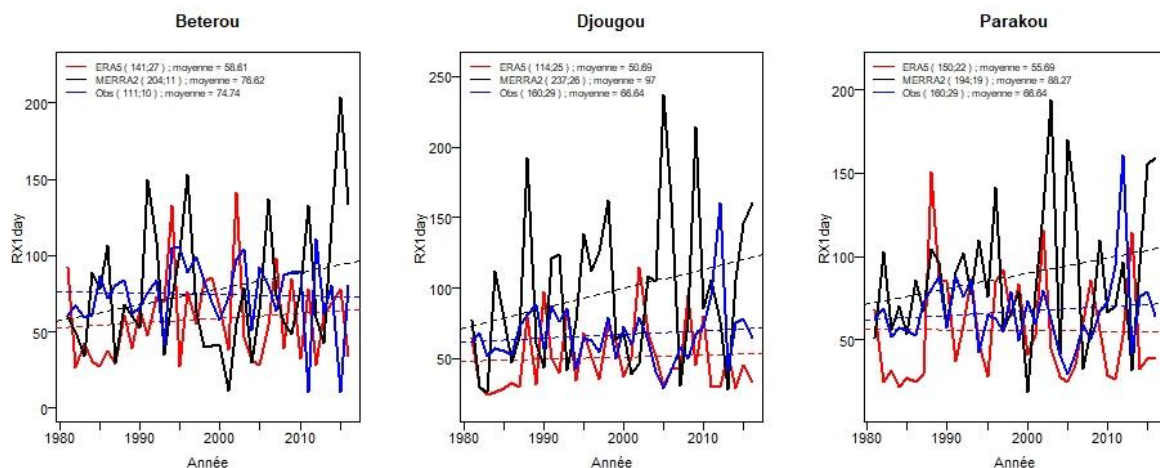


**Figure 6:** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice R20 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou

La figure 6 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice R20 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 6, il ressort que l'indice R20 varie généralement entre 0 et 30 pour les observations, 03 et 21 pour ERA5 et 0 et 19 pour MERRRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 19, 9,9 à la station de Bétérou, 18 ,10, 7 à Djougou et 18 ,9 ,8 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que sur l'ensembles des stations de l'étude les données d'observations surestiment les deux réanalyses. En ce qui concerne l'évolution tendancielle R20 croît généralement au cours des années pour les données ERA5, la même

croissance est observée avec les données d'observations à Parakou et Djougou sauf à Bétérrou où on observe une décroissance. Pour les données MERRA2 R20 est quasi constante à Bétérrou et Djougou mais décroissante à Parakou. On en conclut que R20 croit généralement pour les données ERA5 et les données d'observations.

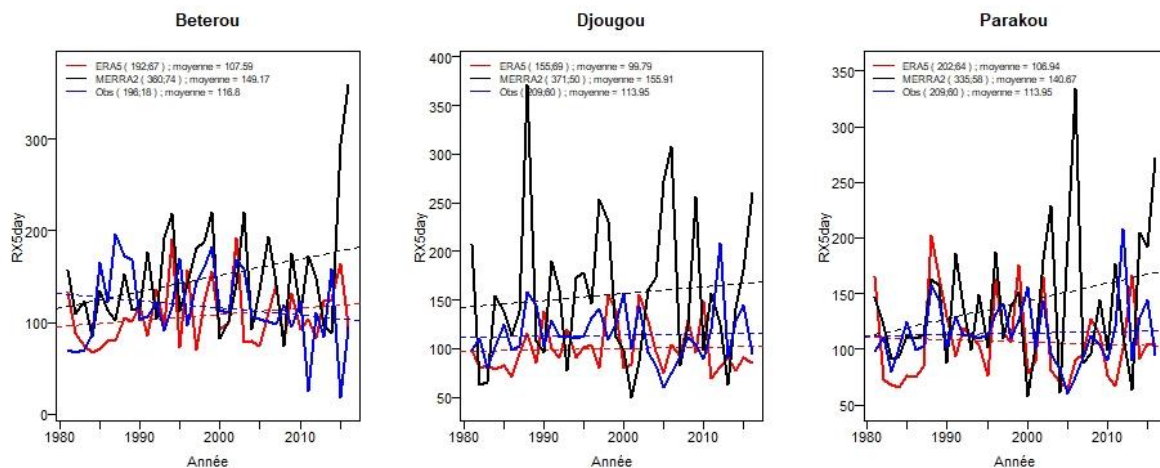
### -RX1day



**Figure 7:** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice RX1day sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou

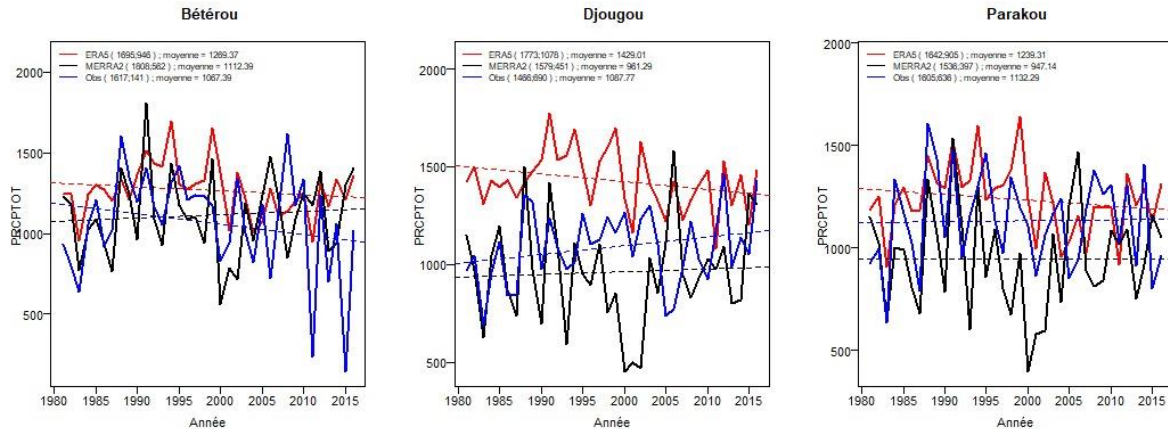
La figure 7 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice RX1day sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 7, il ressort que l'indice RX1day varie généralement entre 11 et 160 pour les observations, 22 et 150 pour ERA5 et 11 et 237 pour MERRRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 75, 59, 77 à la station de Bétérrou, 67, 51, 97 à Djougou et 67, 56 ,88 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que ERA5 sous-estime les observations tandis que MERRA2 les surestime. Pour ce qui est de l'évolution tendancielle l'indice RX1day est croissante avec les données MERRA2 sur les trois stations de l'étude. Par contre pour les données ERA5 et les observations on constate une quasi-constante de RX1day à Parakou et à Djougou sauf Bétérrou où on a une croissance pour ERA5 et une décroissance pour les observations.

## -RX5Day



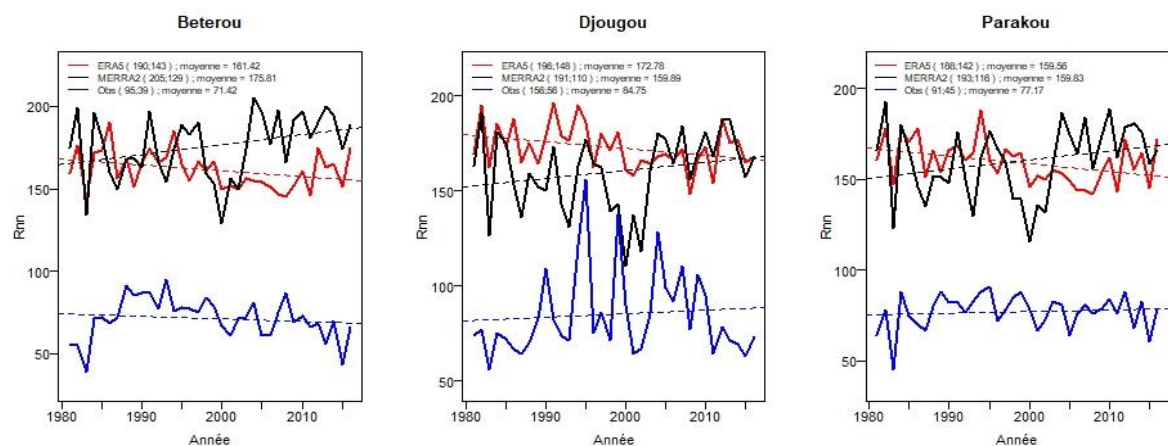
**Figure 8:** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice RX5day sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou

La figure 8 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice RX5day sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 8, il ressort que l'indice RX5day varie généralement entre 18 et 209 pour les observations, 64 et 202 pour ERA5 et 50 et 371 pour MERRRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 117, 108, 149 à la station de Bétérrou, 114 ,100, 156 à Djougou et 114, 107, 141 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que ERA5 sous-estime les observations tandis que MERRA2 les surestime. Pour ce qui est de l'évolution tendancielle l'indice RX1day est croissante avec les données MERRA2 sur les trois stations de l'étude. Par contre pour les données ERA5 et les observations on constate une quasi-constante de RX1day à Parakou et à Djougou sauf Bétérrou où on a une croissance pour ERA5 et une décroissance pour les observations.



**Figure 9:** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice **PRCPTOT** sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou

La figure 9 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice **PRCPTOT** sur les stations de Bétérrou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 9, il ressort que l'indice **PRCPTOT** varie généralement entre 141 et 1617 pour les observations, 905 et 1773 pour ERA5 et 397et 1808 pour MERRRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 1067, 1269, 1112 à la station de Bétérrou, 1088, 1429, 981 à Djougou et 1132, 1239, 947 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que MERRA2 sous-estime les observations tandis que ERA5 les surestime. Pour ce qui est de l'évolution tendancielle, l'indice **PRCPTOT** décroît généralement avec les données ERA5. Par contre, il est généralement croissant pour les observations et les données MERRA2 sauf à Parakou où elle est constante pour MERRA2 et décroissante pour les observations à Bétérrou.



**Figure 10 :** Evolution interannuelle et tendancielle de l'indice R1 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou

La figure 10 présente l'évolution interannuelle et tendancielle de l'indice R1 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou comparé à l'évolution inter annuelle et tendancielle notée sur les réanalyses. De l'analyse de la figure 10, il ressort que l'indice R1 varie généralement entre 45 et 155 pour les observations, 143 et 196 pour ERA5 et 116 et 205 pour MERRA2 sur l'ensemble des stations de l'étude. Les valeurs moyennes des observations, ERA5 et MERRA2 sont respectivement 71.42, 161.42, 175.81 à la station de Bétérou, 85, 160, 173 à Djougou et 77, 157, 160 à la station de Parakou. On constate à partir de ces valeurs que sur l'ensembles des stations de l'étude les deux réanalyses surestiment les observations. En ce qui concerne l'évolution tendancielle, l'indice R1 est généralement croissant pour les données MERRA2 et décroissant pour ERA5 sur les stations de Bétérou, Djougou et Parakou, tandis qu'il est croissant pour les données d'observations à Djougou et Parakou et décroissant à Bétérou.

**Tableau 2 :** Détermination des valeurs des critères RMSE et MAE

**RMSE**

| Stations | Bétérou |        | Djougou |        | Parakou |        |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Indices  | ERA5    | MERRA2 | ERA5    | MERRA2 | ERA5    | MERRA2 |
| R10      | 13.68   | 15.48  | 19.11   | 19.66  | 11.60   | 19.24  |
| R20      | 12.48   | 11.94  | 9.50    | 12.62  | 11.01   | 12.51  |
| PRCPT    | 11.00   | 11.03  | 8.56    | 11.33  | 9.97    | 11.00  |
| RX1day   | 40.80   | 51.42  | 35.59   | 65.88  | 38.05   | 49.80  |
| RX5day   | 55.54   | 84.97  | 39.46   | 89.92  | 37.91   | 71.62  |

**MAE**

| Stations | Bétérou |        | Djougou |        | Parakou |        |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Indices  | ERA5    | MERRA2 | ERA5    | MERRA2 | ERA5    | MERRA2 |
| R10      | 10.88   | 13.25  | 17.33   | 17.66  | 9.86    | 17.11  |
| R20      | 11      | 11.02  | 8.55    | 11.33  | 9.97    | 11     |
| PRCPT    | 12.48   | 11.95  | 9.5     | 12.63  | 11.01   | 12.52  |
| RX1day   | 34.23   | 37.15  | 25.74   | 49.51  | 30.34   | 34.13  |
| RX5day   | 44.40   | 59.90  | 30.04   | 66.33  | 29.32   | 46.37  |

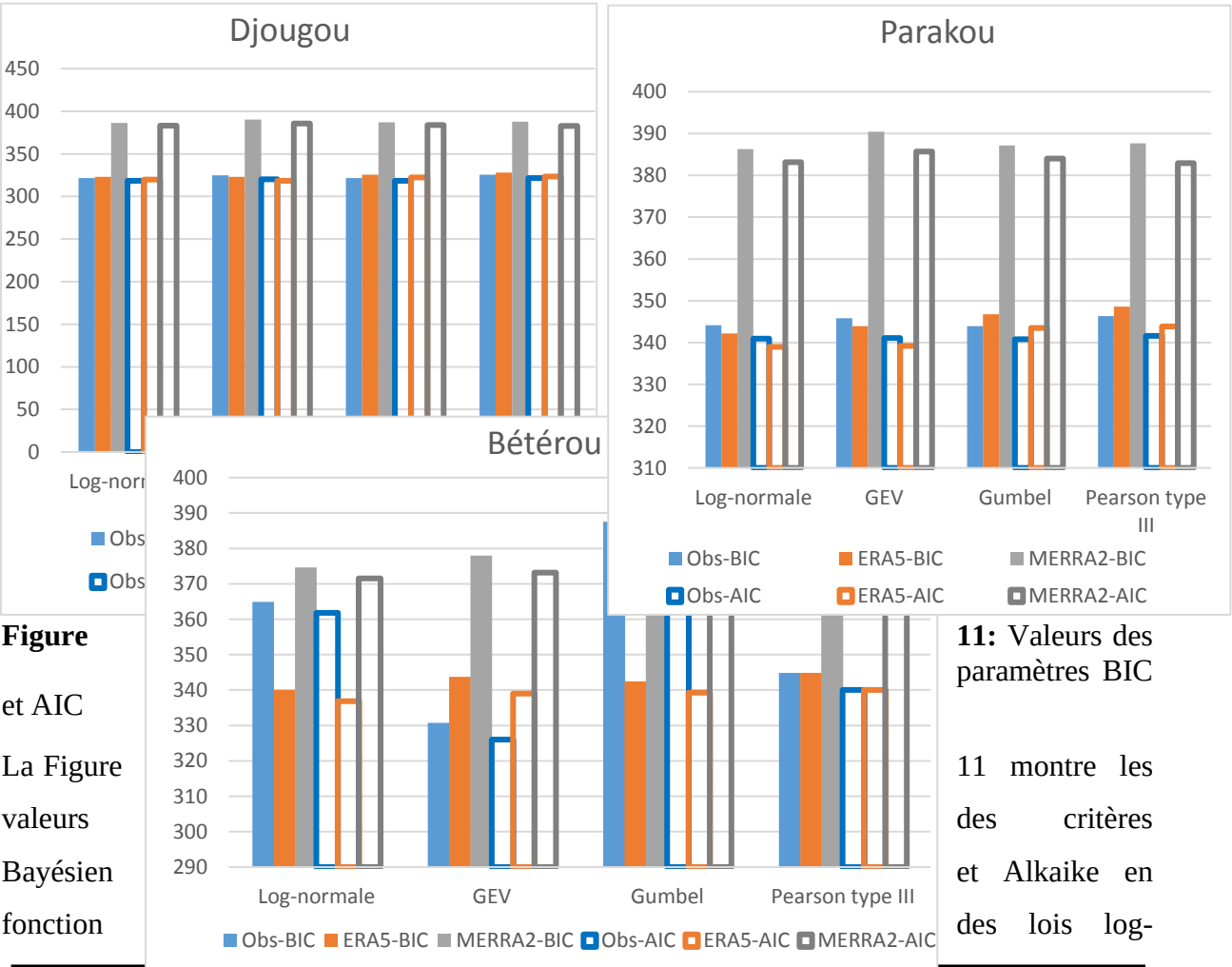
Le tableau 2 présente les valeurs des critères MAE et RMSE obtenues entre ERA5 et les observations d'une part et MERRA2 et les observations d'autre part. L'analyse de ces deux

tableaux révèle que les valeurs les plus faibles des critères MAE et RMSE sont obtenues entre ERA5 et les observations. On confirme de ces valeurs d’erreurs que ERA5 est à prioriser pour une correction beaucoup plus que MERRA2 puisque l’erreurs est moindre.

### 3.2. Analyse fréquentielle des pluies sur le bassin de Bétérou

#### 3.2.1. Comparaison des critères BIC et AIC

La comparaison qui a permis de choisir la meilleure loi est faite à partir de deux critères : le critère d’information Bayésien et le critère d’information d’Akaike.



**Figure 11:** Valeurs des paramètres BIC et AIC. La Figure 11 montre les valeurs des critères d'information Bayésien (BIC) et d'information d'Akaike (AIC) pour les lois log-normale, GEV, Gumbel et Pearson type III.

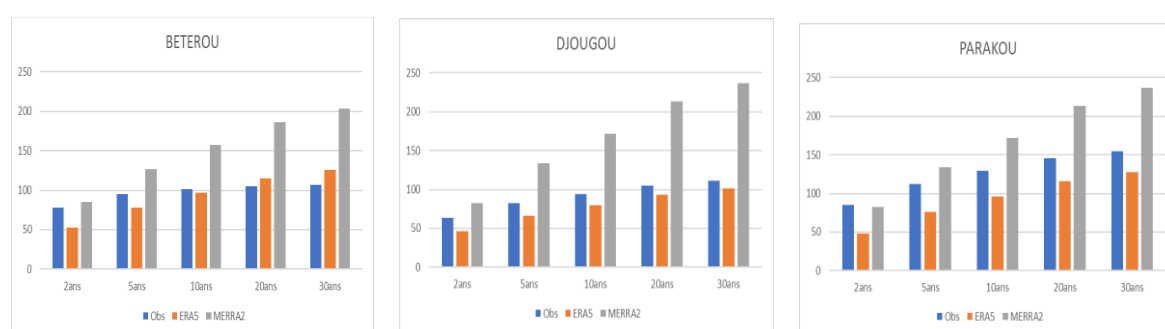
**11:** Valeurs des paramètres BIC et AIC. 11 montre les valeurs des critères d'information Bayésien (BIC) et d'information d'Akaike (AIC) en des lois log-normale, GEV, Gumbel et Pearson type III.

normale, GEV, Gumbel et Pearson de type III. L'analyse de la figure révélée que les lois log-normale, GEV, Gumbel ajustent mieux les observations tandis que seul la loi Log- normale ajustent mieux les données de réanalyses. On retient alors les lois log-normale comme loi qui ajustent mieux les données de réanalyses et Gumbel, GEV et Log-normale pour les données d'observations.

### 3.2.2. Estimation des quantiles aux différentes périodes de retours

L'ajustement des pluies maximales aux tests statistiques a permis d'obtenir les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20,30).

-Quantiles des observations sur les stations de Bétérou



**Figure 12 :** Diagramme des quantiles de pluie en fonction des périodes de retours associées.

Le diagramme ci-dessus présente les valeurs des quantiles obtenues avec la meilleure loi d'ajustement retenue pour chaque série de données. On remarque que le quantile des données de réanalyses MERRA2 surestime toujours la valeur du quantile des observations pour toutes les stations sauf pour la période de retour de 2ans à Parakou. De même, le quantile des données de réanalyses ERA5 sous-estime la valeur du quantile d'observation sauf à Bétérou pour les quantiles de période de retour supérieure à 10 ans. Les erreurs d'estimations sont relativement moins importantes avec ERA5 qu'avec MERRA2.

**Tableau 3:** Valeurs minimales et maximales des quantiles d'ajustement pour les données d'observation et de réanalyses sur toutes les stations

| T       | 2ans |      | 5ans |      | 10ans |      | 20ans |     | 30ans |     |
|---------|------|------|------|------|-------|------|-------|-----|-------|-----|
| Valeurs | Min  | max  | min  | max  | Min   | Max  | Min   | Max | min   | Max |
| Obs     | 63.6 | 84.7 | 82.1 | 112  | 93.9  | 129  | 105   | 146 | 107   | 155 |
| ERA5    | 46.2 | 52.4 | 66.2 | 78.3 | 79.8  | 96.6 | 93.2  | 115 | 101   | 128 |
| MERRA2  | 82.2 | 85.3 | 127  | 134  | 157   | 172  | 186   | 213 | 203   | 237 |

Le tableau 3 présente les valeurs minimales et maximales des quantiles d'ajustement pour les données d'observation et de réanalyses sur toutes les stations. Il résume la tendance quel que

soit la période de retour et le type de données considéré pour l'ajustement. On observe que la plage de variation des quantiles d'ajustement est plus forte pour les observations que pour les réanalyses. Ce qui se justifie des distances de séparation des stations et de la spatialisation des données des réanalyses. De façon globale, ce tableau confirme que pour une analyse fréquentielle des valeurs extrêmes ERA 5 sous-estime les quantiles et MERRA2 les surestime.

**Tableau 4 :** Critère d'appréciation des erreurs MAE et RMSE

| T                    | 2ans |      | 5ans |     | 10ans |      | 20ans |     | 30ans |     |
|----------------------|------|------|------|-----|-------|------|-------|-----|-------|-----|
| Erreurs d'estimation | Min  | max  | min  | max | Min   | Max  | min   | Max | min   | Max |
| Obs-ERA5             | 17.2 | 32.3 | 16   | 34  | 14.1  | 32.4 | 11.8  | 31  | 6     | 27  |
| Obs-MERRA2           | 18.6 | 1    | 44.9 | 22  | 63.1  | 43   | 81    | 67  | 96    | 82  |

Par rapport aux valeurs d'ajustement le tableau 4 se déduit du Tableau 3 et mesure la grandeur des erreurs d'estimation des quantiles entre les données d'observation et celles des réanalyses.

De ce tableau, on remarque que quelque soit la période de retour l'erreur est sensiblement constante entre le quantile des observations et celui de ERA5 pour les valeurs minimales et les celles maximales. De la période de retour de 2ans à celle de 30 ans, l'écart varie très faiblement pour les valeurs minimales de 17 mm à 6 mm. Pour les valeurs maximales, l'écart varie également très faiblement de 34 mm à 27 mm.

Par contre, entre le quantile des observations et celui de MERRA2, l'écart varie graduellement (linéairement) d'une période de retour à une autre plus importante ; que ce soit pour la valeur minimale ou celle maximale des quantiles. Pour la valeur minimale des quantiles, il passe de 19 à 45 à 63 à 81 à 96 mm. Il ressort comme une addition constante de 20 mm sensiblement. Pour la valeur maximale des quantiles, il passe de 1 à 22 à 43 à 67 à 82 mm. L'addition constante de 20mm sensiblement est également observée.

## DISCUSSION

Dans l'optique de mieux appréhender les changements climatiques, notre étude s'est donnée pour objectif d'évaluer l'aptitude des données ERA5 et MERRA2 à remplacer les données d'observations dans les modèles de prédictions qui connaissent aujourd'hui des limites (disponibilité, qualité, données historiques, non disponibilité pour le futur) dans les études hydroclimatiques. Cette étude a été faite sur trois stations du bassin de l'Ouémé à Bétérou. Le présent travail a permis de faire une analyse comparative de six (06) indices de précipitations : R10, R20, R1, PRCTOT, RX1day et RX5day des observations aux réanalyses choisies pour l'étude sur la période 1981 à 2016. Aussi a-t-elle permis de faire des analyses fréquentielles sur le bassin de Bétérou. Pour l'analyse des indices de précipitations, il ressort que les valeurs des indices des réanalyses ERA5 se rapprochent mieux de celles des données d'observations. Notons aussi que les critères d'appréciations des erreurs MAE et RMSE les plus faibles sont obtenues avec ERA5 tandis que pour MERRA2 elles sont plus fortes. Ces résultats sont en accord avec les travaux de l'Institut d'Hydrologie, Météorologiques et d'Etudes Environnementales dans le Bassin du fleuves Sinu en Colombie dont les résultats montrent que ERA5 surpasse MERRA2 dans la zone d'étude (2021).

Les résultats de l'analyse fréquentielle montrent que sur l'ensemble des stations de l'étude on note un bon ajustement des données d'observations par les lois GEV, Gumbel et Log-normale tandis que pour les deux réanalyses la meilleure loi est la lois Log-normale avec un intervalle de confiance de 95%.

Le calcul des valeurs de quantile après ajustement de la meilleure loi retenue montre à partir des valeurs des quantiles obtenus que les données de réanalyses MERRA2 surestiment généralement les données d'observations, au moment où les données de réanalyses ERA5 les sous-estiment. Ces résultats sont en liens avec les résultats trouvés par l'Institut d'Hydrologie, Météorologiques et d'Etudes Environnementales dans le Bassin du fleuves Sinu en Colombie dont les résultats montrent que ERA5 surpasse MERRA2 dans la zone d'étude (2021).

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

L'intérêt de ce travail a été d'évaluer l'aptitude des modèles ERA5 et MERRA2 à mieux simuler les observations sur trois stations du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sur la période de 1981 à 2016 en étudiant les événements passés afin d'avoir une meilleure connaissance de leurs apparitions futures. Ce travail a permis de faire une analyse comparative interannuelle et tendancielle des indices de précipitations sur la période d'étude et une estimation des erreurs entre observations et réanalyses afin de déduire des liens éventuels existants. Les résultats obtenus montrent que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) les plus faibles sont observées sur réanalyses ERA5 tandis que pour MERRA2 et observations elles sont plus élevées. On peut affirmer qu'il existe un lien entre les données de réanalyses ERA5 et les données observations pour les indices.

La Log-normale est adaptée pour l'ajustement des valeurs extrêmes obtenues avec les données de réanalyses dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou tandis que la loi GEV s'adapte mieux à l'ajustement des données d'observations. Les valeurs des quantiles obtenues montrent que les données de réanalyses MERRA2 surestiment généralement les données d'observations, au moment où les données de réanalyses ERA5 les sous-estiment. Il faut procéder à une correction de biais sur les données avant une utilisation sérieuse.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam K S., Boko M. 1993. Le Bénin. Paris. Edicef, 2ème édition, 93 P.
- Ague E., 2015. Analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques dans la zone subéquatoriale du Bénin
- Beniston M. et Sephenson D.B., 2004. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. Global and Planetary Change, vol. 44, p. 1-9.
- Boko M., Adjovi L. C., 1994. Recherche des tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional. Implications agroclimatiques. Publication de l'association Internationale de climatologie. Volume 7. Thessaloniki, pp 294-304.
- Goubanova, K., and Li, L., 2007. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. Global and Planetary Change, 57(1-2), 27-42.
- Kouassi A. M., 2011. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur le régimes pluviométriques saisonniers en afrique de l'Ouest.
- Lemaitre 2002. Identification de ruptures dans la série pluviométrique de kouandé, p.14.
- N'Tcha M'Po, Y. 2012. Contribution à la modélisation du processus de transformation pluie-débit : application au sous-bassin de Magou dans le bassin de la Volta. In *INE*, 75. Université d'Abomey-Calavi.  
N'Tcha M'Po, Y. 2018 Evaluation de l'impact des changements climatiques et d'utilisation des terres sur les ressource en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou à l'horizon 2050. Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY, 180p
- Obada, 2017. Approche de quantification des changements récents et futurs de quelques paramètres hydro-climatiques dans le bassin de la Mékrou (Bénin), thèse de doctorat, 212 P.
- OMM 2006. Gestion intégrée des crues: aspects sociaux et participation des parties prenantes. APFM, politiques de gestion des crues. 106 P.
- 
- IPCC 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the fourth Assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, pp 391-431.
- Samokhin A.A. et Soloviova N. N. & Doguanovsky A.M., 1980. Hydrologie pratique. Ed : Hydro-météo Leningrad. PP 57-74.

- Vissin E. W., 1998. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la ---Sota. Mémoire de maîtrise 123 P. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, 123 pages.
- Vissin E. W., 2001. Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA 53 P. Université de Bourgogne, Dijon, France.
- Vissin E.W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 P.
- Palutikof, J. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*, 81(1), 71-95.
- Yoshino F., 1999. Prévision hydrologique.
- Zannou, A. B. Y. 2011. Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin: Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou. In *Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA - Chaire UNESCO)*, 356. Abomey-Calavi : University of Abomey-Calavi.

## ANNEXES

### 1-Critères de performances

|         | LOI              | Paramètre | BIC    |        |        | AIC    |        |        |
|---------|------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         |                  |           | OBS    | ERA5   | MERRA2 | OBS    | ERA5   | MERRA2 |
| Bétérou | Log-normale      | 2         | 364.95 | 340.05 | 374.66 | 361.78 | 336.89 | 371.50 |
|         | GEV              | 3         | 330.73 | 343.78 | 377.96 | 325.98 | 339.03 | 373.21 |
|         | Gumbel           | 2         | 387.58 | 342.45 | 378.23 | 384.41 | 339.28 | 375.06 |
|         | Pearson type III | 3         | 344.82 | 344.82 | 376.13 | 340.07 | 340.07 | 371.38 |
| Djougou | Log-normale      | 2         | 321.51 | 322.97 | 386.32 | 318.35 | 319.80 | 383.15 |
|         | GEV              | 3         | 324.86 | 323.16 | 390.46 | 320.11 | 318.41 | 385.71 |
|         | Gumbel           | 2         | 321.60 | 325.45 | 387.17 | 318.43 | 322.29 | 384    |
|         | Pearson type III | 3         | 325.1  | 328.23 | 387.69 | 321.2  | 323.48 | 382.94 |
| Parakou | Log-normale      | 2         | 344.13 | 342.14 | 386.32 | 340.96 | 338.97 | 383.15 |
|         | GEV              | 3         | 345.82 | 343.93 | 390.46 | 341.07 | 339.18 | 385.71 |
|         | Gumbel           | 2         | 343.95 | 346.75 | 387.17 | 340.79 | 343.50 | 384    |
|         | Pearson type III | 3         | 346.32 | 348.59 | 387.69 | 341.57 | 343.84 | 382.94 |