

Faculté des Lettres, Arts et Sciences  
Humaines (FLASH)



Ecole Doctorale Pluridisciplinaire  
« Espace, Culture et Développement  
(EPD) »

Université d'Abomey-Calavi  
(UAC)



Faculté des Sciences et Techniques  
(FAST)



Chaire Unesco Science, Technologie  
et Environnement (CUSTE)

.....&.....

**Laboratoire Pierre PAGNEY Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement  
(LACEEDE)**

.....&.....

**Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies  
(DEA)**

.....&.....

**Option : Géosciences de l'Environnement et Aménagement du Territoire**

.....&.....

**Spécialité : Géographie et Gestion de l'Environnement**

.....&.....

N° d'enregistrement/\_\_\_\_\_/EDP/GEN

# **CARACTERISATION ET DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES PLUIES EXTREMES DANS LE NORD-BENIN**

**Présenté par :**

Aristide Gbènagnon KOUTON

**Sous la direction de :**

Dr. Fulgence AFOUDA

Maître de Conférences (DGAT/FLASH/UAC)

*Soutenu publiquement le 30 / 06 / 2014 devant le Jury composé de :*

**Président** : Christophe S. HOUSSOU (Professeur Titulaire, DGAT/FLASH/UAC)

**Rapporteur** : Fulgence AFOUDA (Maître de Conférences, DGAT/FLASH/UAC)

**Examineur** : Euloge OGOUWALE (Maître de Conférences, DGAT/FLASH/UAC)

**Mention : Très Bien**

## Sommaire

Sommaire .....	2
Liste des sigles et acronymes .....	4
Avant propos .....	5
Résumé .....	7
Abstract .....	7
Introduction .....	8

### CHAPITRE I

<b>ETAT DES CONNAISSANCES, PROBLEMATIQUE, CLARIFICATION DES CONCEPTS ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE .....</b>	<b>10</b>
1.1. Etat des connaissances et justification du sujet .....	10
1.2. Clarification des concepts .....	12
1.3. Hypothèses de travail .....	13
1.4. Objectifs de recherche.....	13
1.5. Démarche méthodologique .....	13

### CHAPITRE II

<b>FACTEURS GENERATEURS DES PLUIES EXTREMES DANS LE NORD-BENIN .....</b>	<b>22</b>
2.1. Contexte climatique du Nord-Bénin .....	22
2.2. Circulation atmosphérique et facteurs pluviogéniques du Nord-Bénin.....	24

### CHAPITRE III

<b>CARACTERISTIQUES DES PLUIES EXTREMES AUX ECHELLES ANNUELLES ET SAISONNIERES .....</b>	<b>31</b>
3.1. Pluies extrêmes annuelles .....	31
3.2. Pluies extrêmes saisonnières .....	38

### CHAPITRE IV

<b>EXTREMES PLUVIOMETRIQUES A L'ECHELLE JOURNALIERE.....</b>	<b>43</b>
4.1. Valeurs record des pluies journalières .....	43
4.2. Extrêmes journaliers positifs.....	44
4.3. Périodes de retour des extrêmes journaliers positifs.....	50
4.4. Discussion .....	54
4.5. Limites de la présente recherche.....	55
Conclusion et perspectives pour les travaux futurs .....	57
Bibliographie.....	59
Liste des figures .....	64
Liste des tableaux.....	64
Table des matières.....	65

## Dédicace

A

☪ *mon fils Arismen Gigonou KOUTON et*

☪ *mon épouse Amen HONFO.*

## Liste des sigles et acronymes

- ASECNA** : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
- CENATEL** : Centre National de Télédétection et de Surveillance du Couvert Végétal
- CNUCC** : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
- DGAT** : Département de Géographie et Aménagement du Territoire
- DMN** : Direction de la Météorologie Nationale
- GES** : Gaz à Effet de Serre
- GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- INSAE** : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
- IPCC** : Intergovernmental Panel on Climate Change
- LACEEDE** : Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement
- PNUD** : Programme des Nations-Unies pour le Développement

## **Avant propos**

Cette recherche est une contribution à une bonne connaissance des caractéristiques, de la dynamique, dans le temps et dans l'espace, des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin. Elle a été réalisée grâce aux soutiens de diverses personnes à qui je me dois d'exprimer mes sincères remerciements.

Je tiens avant tout à remercier chaleureusement le Professeur Fulgence AFOUDA, pour avoir accepté de diriger ce mémoire. Il m'a formé, a toujours suivi mes travaux et a amélioré la qualité de ce travail par ses conseils et suggestions. Des idées, explications, critiques, encouragements, etc. sont autant de contributions dont j'ai bénéficié de sa part pour conduire à terme ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi au Professeur Euloge OGOUWALE, aux Docteurs Ibouaïma YABI, Cyr G. ETENE et Romaric OGOUWALE pour leurs contributions. Leurs encouragements et incitation au travail bien fait, leur sens de pousser à mieux faire par divers moyens et méthodes, les nombreux échanges scientifiques, les nombreuses corrections ont été très utiles à la réalisation de ce mémoire.

J'exprime toute ma reconnaissance à tous les membres du Laboratoire Pierre PAGNEY « Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) pour leurs conseils et soutien moral.

Ma sincère gratitude va à l'endroit de mes amis de promotion de DEA de l'année académique 2011-2012 pour leur sympathie et leur contribution scientifique à travers les nombreux échanges que nous avons eus.

Je dis merci à Messieurs Blaise T. DONOU, Hervé D. KOUMASSI, Japhet D. KODJA, Patrice M. BOKO, Marcellin ASSOGBA, Philippe CHABI, Etienne AKAKPO, Fidèle K. MEDEOU, Akibou A. AKINDELE, Epiphane S. DAH WLOKONON, Armand ZANKPO, Thierry H. CODJO et Imorou OUOROU-BARRE pour les différents appuis et contributions dont j'ai bénéficié de leur part.

A tous les membres de ma famille : mon père Gratien, ma feuë mère Emilienne, mes frères et sœurs Léonard, François, Barnabé, Rodrigue, Raymonde, Marcos, Donatien,

Donatienne, Nadège, Prisca, Belvida, Fiacre et Fortuné, je dis merci pour les soutiens de tout genre.

Je prie mon épouse Amen HONFO et mon fils Arismen Gigonou KOUTON d'accepter l'expression de ma profonde gratitude. Je leur exprime mes sincères marques de sympathie pour leurs soutiens de tout genre et leur compréhension.

Je remercie infiniment les membres de Jury pour avoir accepté de contribuer à l'amélioration de la qualité scientifique du présent document.

Mes marques de reconnaissance vont enfin à tous ceux qui ont contribué de quelque manière à la réalisation de ce travail.

## **Résumé**

Le but de cette étude est d'analyser la dynamique spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin.

Pour y parvenir, une analyse statistique des séries annuelle, saisonnière et journalières des pluies extrêmes sur la période 1951-2010 a été réalisée en considérant les données de huit (08) stations dont trois synoptiques, deux (02) climatologiques et trois (03) pluviométriques. Les lois des valeurs extrêmes utilisées sont la loi généralisée des valeurs extrêmes et la loi de Gumbel. Aussi, cette étude a-t-elle abordé l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes avec l'ajustement des lois de Gumbel et de Pearson 3.

Les résultats issus des analyses des hauteurs de pluies extrêmes aux échelles saisonnière et annuelle ont montré que le nombre moyen annuel de pluies extrêmes a diminué de 2,48 % au cours des années 70 surtout très sèches par rapport aux années normales. La hauteur de pluie par événement pluvieux extrêmes semble être plus élevée aux stations du nord-ouest de la région d'étude et faible au nord-est, et cette valeur a décliné partout au cours de la période 1951-2010. Les hauteurs de pluies extrêmes saisonnières sont bien corrélées avec le nombre annuel d'événements pluvieux extrêmes.

**Mots clés :** Nord-Bénin, pluies extrêmes, caractérisation, dynamique spatio-temporelle

## **Abstract**

The goal of this study is to analyze the space-time dynamics of the extreme rains in the Benin one.

For that purpose, a statistical analysis of the series annual, seasonal and day laborers of the extreme rains over the period 1951-2010 was carried out by considering the data of eight (08) stations including three synoptic, two (02) climatologically and three (03) pluviometric. The extreme values used are the generalized law of the extreme values and the law of Gumbel. Also, this study it approached the frequential analysis of the extreme rains with the adjustment of the laws of Gumbel and of Pearson 3 has.

The results resulting from the analyses heights of extreme rains on the scales seasonal and annual showed that the annual average number of extreme rains fell by 2,48 % during the very dry Seventies especially compared to the normal years. The height of rain per rainy event extremes seems to be higher at the stations of the western of the reg. ion of study and weak north in north east, and this value decreased everywhere during the period 1951 -2010. The heights of rains extremes seasonal are well correlated with the annual number of extreme rainy events.

**Key words:** North-Benin, extreme rains, characterization, space-time dynamics

## **Introduction**

Les dernières décennies de la fin du deuxième millénaire ont été marquées par une évolution rapide des climats à l'échelle globale (Olaniran, 1991) et une forte occurrence des événements pluviométriques extrêmes (IPCC, 2007 ; Yabi et Afouda, 2010). En raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel et sur l'homme, les questions relatives à la variabilité climatique et aux extrêmes pluviométriques sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde (IPCC, 2009).

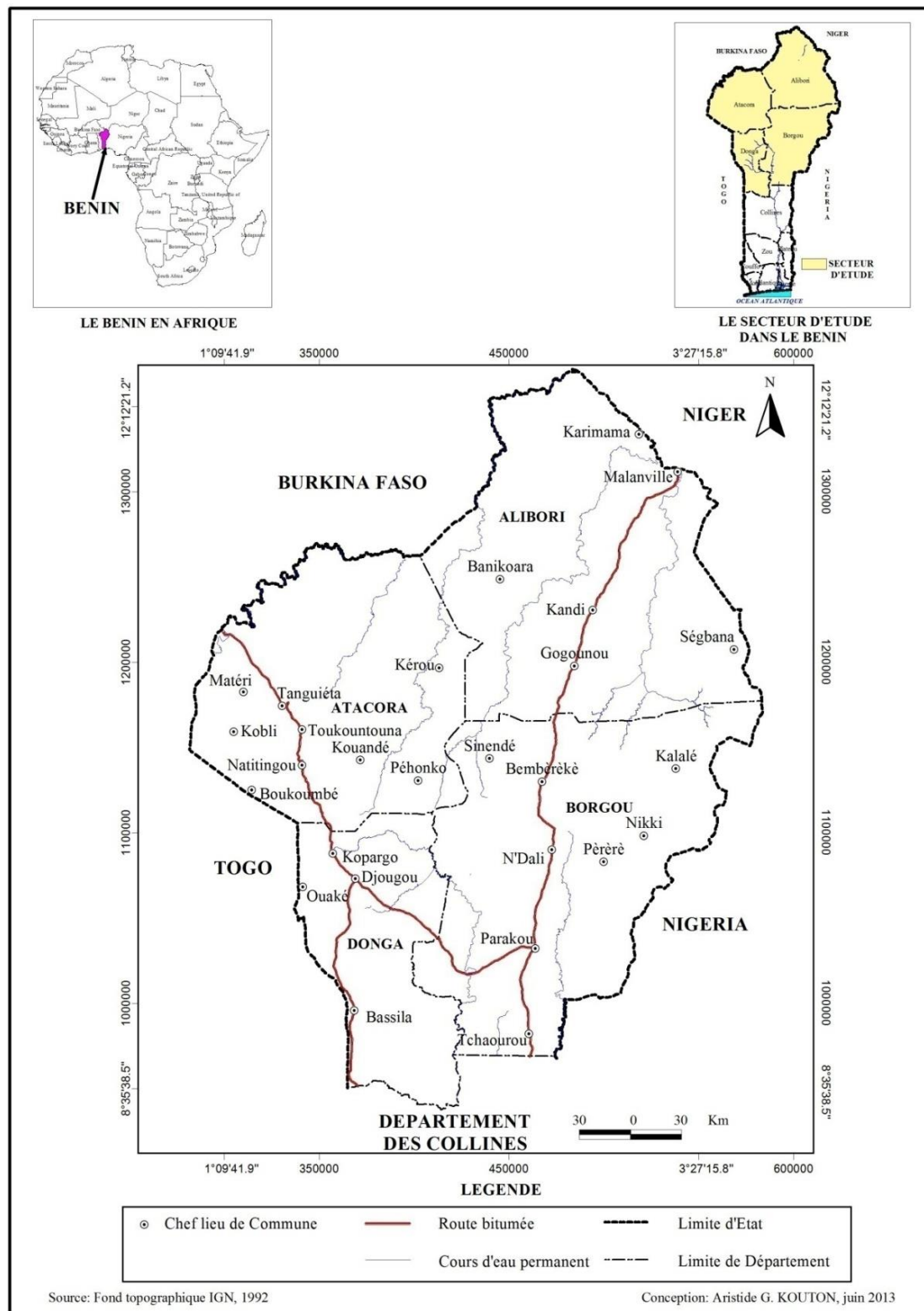
Les pluies extrêmes sont des événements certes rares, mais de tout temps, et leur caractère imprévisible impose à l'homme la recherche de solutions appropriées, en vue d'y faire efficacement face (OMM, 2002).

Au Bénin, plusieurs cas de pluies extrêmes ont été enregistrés. Les plus récents sont les manifestations pluvio-orageuses et les pluies diluviennes, survenues dans le centre-Bénin en juillet 1999, et dans tout le pays en 2010 (Social Watch, 2010), ayant occasionné des inondations ; la perturbation orageuse qui a donné lieu à une forte tempête à Sô-Ava le 8 mai 2001 provoquant la mort d'une trentaine de personnes ; les manifestations orageuses du 18 au 25 mars 2002 qui ont causé la destruction des trois modules de classes à Athiémé et le dernier en date est celle du 14 avril 2003 dans certaines localités du sud du pays (Houndakinnou, 2005).

Pour réduire la vulnérabilité des communautés et de leurs moyens d'existence, il faut bien comprendre les modes de répartition des pluies extrêmes dans le temps et dans l'espace.

Le présent mémoire qui porte sur la caractérisation et la dynamique spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin s'articule autour de quatre chapitres. Le premier est consacré au développement du cadre théorique et de la démarche méthodologique adoptée. Le second décrit les facteurs générateurs des pluies extrêmes dans le cadre d'étude. Le troisième chapitre présente les caractéristiques des pluies extrêmes aux échelles saisonnière et annuelle dans le Nord-Bénin. Le quatrième chapitre montre les caractéristiques des extrêmes pluviométriques à l'échelle journalière suivi d'une discussion.

Le Nord-Bénin est situé entre les parallèles 8°35' et 12°12' de latitude nord et entre 1°09' et 3°27' de longitude est. Elle est limitée au nord-ouest par le Burkina-Faso, au nord-est par le Niger, au sud-ouest par la République du Togo, au sud-est par la République fédérale du Nigeria, et au sud par les Départements des Collines (figure 1).



**Figure 1 : Situations géographique et administrative du Nord-Bénin**

## CHAPITRE I

### ETAT DES CONNAISSANCES, PROBLEMATIQUE, CLARIFICATION DES CONCEPTS ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Ce chapitre présente l'état des connaissances, la justification du sujet ainsi que la démarche méthodologique qui a permis d'atteindre les objectifs de l'étude.

#### 1.1. Etat des connaissances et justification du sujet

Le climat de la terre est soumis ces six dernières décennies à des variations importantes de ses principaux paramètres (Wigley, 1981 cité par Ogouwalé, 2006). Selon le GIEC (2007), ces variations se manifestent par la multiplication des événements climatiques extrêmes. La principale cause d'une telle situation est l'augmentation de la température de la terre consécutive au doublement de l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES), notamment le CO<sub>2</sub> (Escourrou, 1987). En effet, entre 1750 et 1999, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est passée de 280 ppm à 367 ppm et la concentration actuelle de CO<sub>2</sub> n'avait jamais été dépassée durant les 420 000 dernières années et ne l'avait probablement pas été durant les 20 derniers millions d'années (Carter, 1995). Cette augmentation continue en CO<sub>2</sub> influence directement le climat global et par conséquent la vie sur terre (Amani *et al.*, 2010).

En outre, selon les modèles de circulation générale et de prévision saisonnière de la PRESAO<sub>1</sub>, les pays en voie de développement comme le Bénin seront les plus vulnérables à l'évolution climatiques.

Par ailleurs, pour Colin (2004), les régimes climatiques actuels tendent à indiquer un réchauffement de la planète et une augmentation du nombre de phénomènes météorologiques extrêmes dont les précipitations extrêmes. Abondant dans le même ordre d'idée, André (2007) précise que, dans les régions tropicales, les extrêmes climatiques ont augmenté de fréquence depuis 1970 environ. Pour Leridon (2007), cette augmentation accentue la vulnérabilité des peuples surtout dans les pays en développement.

Au Bénin, dans un contexte de tendance générale à la baisse des hauteurs de pluies annuelles, il survient par moments de fortes pluies génératrices d'inondations, parfois

désastreuses voire dramatiques sur le plan socio-économique (Afouda, 1990 ; IPCC, 2007).

Dans le Nord-Bénin, l'analyse des données climatologiques enregistrées sur 60 ans montrent une tendance à la baisse des hauteurs de pluies annuelles. De plus, le mode de répartition des pluies évolue vers le retard des événements pluvieux et le raccourcissement de l'unique saison pluvieuse qui caractérise normalement la région (Houndénou, 1999). Toute manifestation météorologique extrême, qu'il s'agisse de vents violents, de fortes pluies, de jours consécutifs de pluie, ou de déficit prolongé de précipitations, etc., présente un gros risque pour l'homme et son environnement à travers les différents dégâts qu'elle occasionne: inondation, fort ruissellement, sécheresse, détérioration de l'environnement et destruction d'infrastructures. A l'origine de ces manifestations que génèrent les pluies extrêmes, s'observent des conditions météorologiques de courtes durées et à petites échelles (GIEC, 2007). Mieux, Yabi et Afouda (2007) ont montré que l'analyse fréquentielle permet de se rendre compte de la durée d'apparition des événements climatiques exceptionnels dont la non maîtrise augmente la vulnérabilité des populations.

Plusieurs études ont porté sur les extrêmes pluviométriques dans le Nord-Bénin sans pour autant permettre de maîtriser les caractéristiques et la dynamique de ces extrêmes. C'est fort de ce constat que la présente recherche a été entreprise dans le cadre de la rédaction d'un mémoire de DEA. La présente étude se fonde sur les interrogations suivantes :

- l'occurrence des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin a-t-elle connue une augmentation ou une diminution sur la période d'analyse ?
- existe-t-il une différence entre le nord-ouest et le nord-est en matière de distribution des pluies extrêmes dans la région d'étude ?

Pour répondre à ces interrogations, des hypothèses de travail sont émises. Mais avant, une clarification des concepts s'avère nécessaire pour une bonne compréhension des terminologies utilisées dans le cadre de ce travail.

## 1.2. Clarification des concepts

**Événement climatique extrême :** Selon le quatrième rapport annuel du GIEC (2007), un événement climatique extrême est un événement rare en un lieu et à une époque de l'année. Il faut préciser que les définitions de « rare » varient, mais un événement météorologique extrême est normalement aussi rare ou plus rare que le 10<sup>e</sup> ou 90<sup>e</sup> centile de la fonction de densité de probabilité d'apparition d'une pluie de valeurs données. Lorsqu'un événement météorologique extrême se prolonge, par exemple, sur une saison, il peut être qualifié d'événement climatique extrême. Cette définition distingue les événements météorologiques et climatiques par leurs durées. Un événement climatique extrême est donc un événement exceptionnel par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres sur un territoire donné. Dans le cadre de cette étude, il s'agit des pluies dont les valeurs enregistrées sont inhabituelles.

**Pluies extrêmes :** La définition même de pluie extrême est délicate. De manière classique, une pluie extrême peut être définie par une pluie dépassant un seuil élevé donné ou par la pluie maximale observée en une année donnée (Amani et *al.*, 2010). Pour le même auteur, le terme "pluies extrêmes" caractérise des événements pluviométriques de forte intensité se produisant sur un pas de temps court et de faible occurrence à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces événements exceptionnels sont généralement à l'origine de catastrophes naturelles telles que les crues, inondations et mouvements de terrain, dont l'impact sur les zones urbanisées s'avère souvent non négligeable tant sur le plan économique qu'humain. Pour le GIEC (2001), les pluies extrêmes sont des manifestations pluvieuses correspondant aux 10 percentiles supérieurs et inférieurs de pluie. C'est cette dernière clarification qui a été adoptée dans le cadre de cette recherche.

**Répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes :** Selon le Larousse (2009), la répartition est la manière dont une chose est distribuée, partagée. Cette distribution peut se faire soit dans le temps, soit dans l'espace. Dans le cadre de cette étude, il s'agit du mode de distribution des pluies extrêmes dans l'espace et dans le temps au cours des 60 dernières années au Nord-Bénin.

Cette recherche est fondée sur les hypothèses et objectifs suivants.

### **1.3. Hypothèses de travail**

- Les pluies extrêmes sont plus fréquentes dans le nord-ouest que dans le nord-est de la région d'étude.
- Le gradient des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin est sud-ouest-nord-est.

Ces hypothèses de recherche ont été vérifiées à travers les objectifs ci-après.

### **1.4. Objectifs de recherche**

L'objectif global de cette recherche est d'étudier la dynamique spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin.

De façon spécifique, il s'agit de :

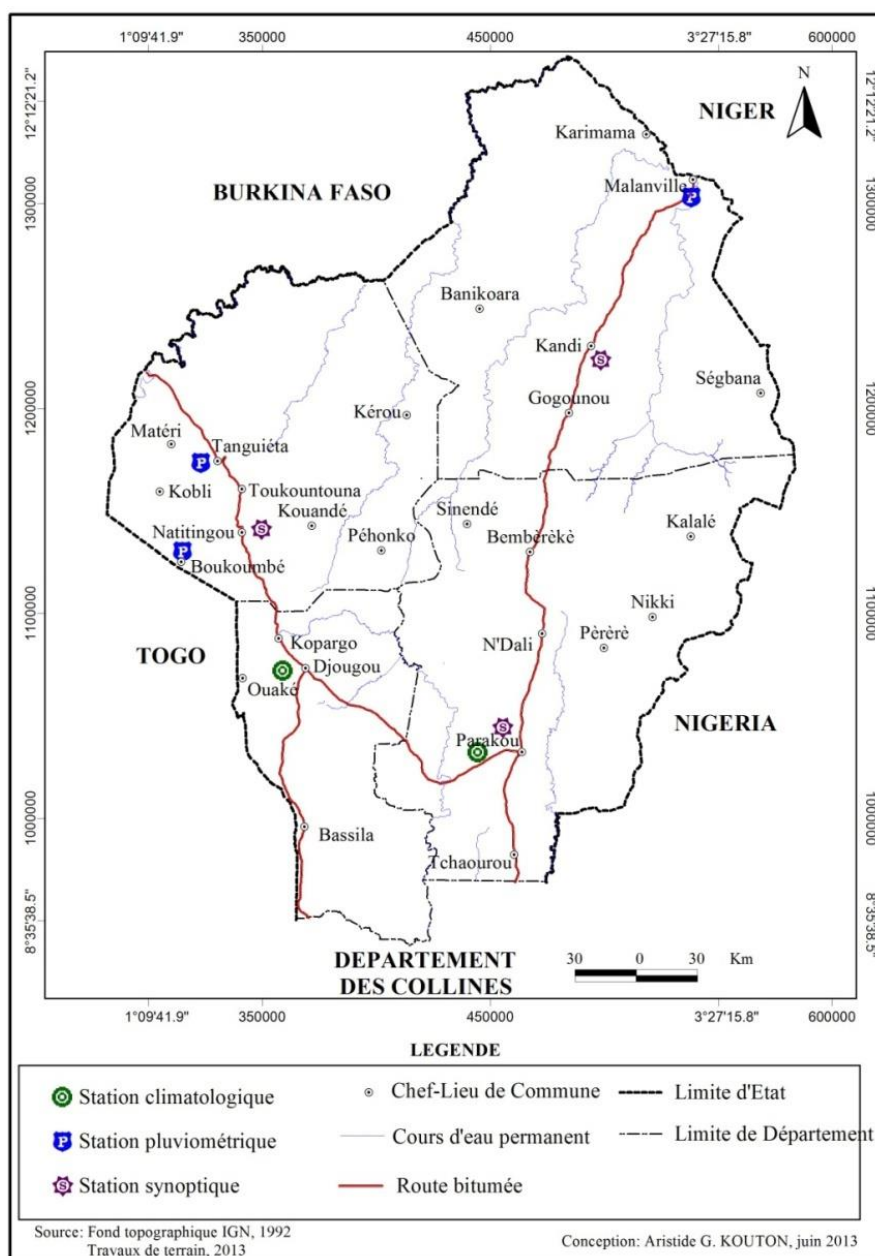
- ❖ déterminer l'occurrence des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin ;
- ❖ analyser les tendances des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin ;
- ❖ extrapoler la répartition spatiale et temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin.

### **1.5. Démarche méthodologique**

La démarche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude a consisté en la collecte des données pluviométriques, leur traitement et en l'analyse et interprétation des résultats.

#### **1.5.1. Données utilisées**

Dans le cadre de cette étude, un seul type de donnée a été utilisé. Il s'agit des hauteurs de pluies aux échelles journalières, mensuelles et annuelles obtenues à l'ASECNA sur la période 1951-2010. Ces données concernent huit (8) stations du Nord-Bénin, dont deux (02) climatologiques, trois (03) synoptiques et trois (03) pluviométriques (figure 2).



**Figure 2 : Réseau des stations retenues**

Les caractéristiques de ces stations sont présentées dans le tableau I.

**Tableau I : Caractéristiques des stations et postes dont les données ont été utilisées**

N°	Stations	Nature	Latitude	Longitude	Années de création	Départements
1	Boukoubé	Pluviométrique	10°10' N	01°06' E	1923	Donga
2	Bétérou	Climatologique	9°20' N	2°26' E	1950	Borgou
3	Djougou	Climatologique	09°42' N	01°40' E	1922	Donga
4	Kandi	Synoptique	11°08' N	02°56' E	1922	Alibori
5	Malanville	Pluviométrique	11°52' N	03°24' E	1942	Alibori
6	Natitingou	Synoptique	10°19' N	01°23' E	1922	Atakora
7	Parakou	Synoptique	09°21' N	02°36' E	1921	Borgou
8	Tanguiéta	Pluviométrique	10°37' N	01°16' E	1937	Atacora

**Source des données : ASECNA, mars 2012**

Ces stations retenues obéissent aux critères de longueur des séries et de la qualité des données, comme prévu par l'Organisation Météorologie Mondiale (OMM).

### **1.5.2. Recherche documentaire**

Elle a été dans le cadre de cette étude, une étape essentielle qui a permis de faire l'état des connaissances sur les pluies extrêmes en général et à l'échelle du Nord-Bénin en particulier. Cette recherche a été réalisée dans les centres, services et institutions de recherche dont les activités ont un rapport avec l'objet de cette recherche. Il s'agit, entre autres, du Laboratoire Pierre Pagney, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), de l'Agence de Sécurité pour la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA), dans le centre de documentation de la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH). Ces données et informations collectées ont été complétées par les résultats issus du traitement des données pluviométriques.

### **1.5.3. Traitement des données**

Le traitement des données a été possible grâce à l'usage de plusieurs outils statistiques.

#### **➤ Calcul des indices pluviométriques**

Les méthodes de calcul des indices pluviométriques utilisés sont essentiellement statistiques.

#### **➤ Anomalies pluviométriques**

Les anomalies pluviométriques inter-annuelles et saisonnières ont été déterminées pour chaque station selon la formule :

$$\lambda = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad \text{avec :}$$

X, la valeur de la précipitation annuelle ;

$\bar{x}$ , la moyenne inter-annuelle de la série pluviométrique considérée (1951-2010) ;

$\sigma$ , l'écart type de la série ; et

$\lambda$ , la valeur centrée réduite.

L'anomalie est un indice centré réduit qui désigne une situation de déficit et d'excédent par rapport à la moyenne jugée comme une situation pluviométrique ou hydrologique normale.

➤ **Méthode d'analyse de la variabilité pluviométrique**

Pour évaluer la variabilité pluviométrique sur la série 1951-2010, le calcul de la moyenne arithmétique a été fait suivant la formule :  $\bar{X} = \sum X_i / N$  Cette moyenne arithmétique est considérée comme la situation pluviométrique normale de la série.

L'écart type a permis de mesurer le degré de variabilité et la dispersion autour de la valeur centrale ; il s'obtient en cherchant la racine carrée de la variance.  $Ecr = \sqrt{X}$  où X est la variance.

### **1.5.3.1. Détermination des pluies extrêmes**

La détermination des pluies extrêmes s'est basée sur l'utilisation de divers protocoles statistiques appliqués aux données pluviométriques.

#### **1.5.3.1.1. Détermination des valeurs extrêmes d'après la théorie de "la distribution des valeurs extrêmes"**

Les valeurs extrêmes ont été déterminées à partir de la série des hauteurs maximales de pluie en 24 heures. La théorie des valeurs extrêmes a été utilisée pour déterminer les périodes de retour. Son application courante est la loi de Gumbel, une loi doublement exponentielle.

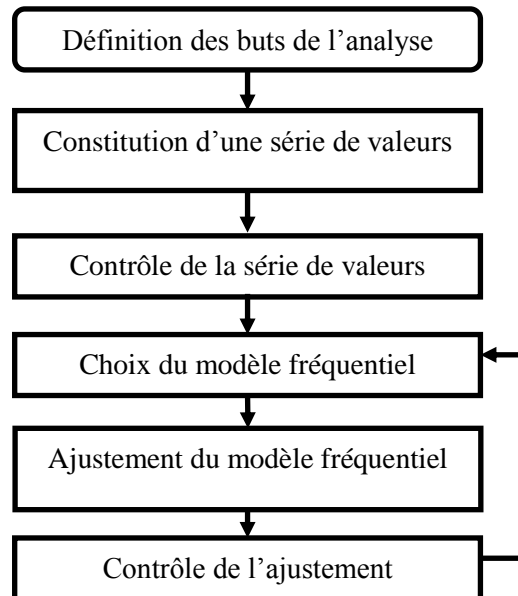
➤ **Détermination de la fréquence des pluies extrêmes**

L'analyse de la fréquence des pluies extrêmes est faite grâce au modèle d'analyse fréquentielle.

➤ **Analyse fréquentielle**

L'analyse fréquentielle permet de caractériser l'évolution des pluies extrêmes enregistrées afin d'en définir les probabilités d'occurrence (Meylan et Musy, 1999). Cette méthode repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'une série de pluies extrêmes.

Ce modèle décrit la probabilité d'apparition d'une pluie de valeur données (Auliac, 1995 ; Houndakinnou, 2005). Les diverses étapes de l'analyse fréquentielle sont présentées dans la figure 3.



**Figure 3 :** Principales étapes de l'analyse fréquentielle  
**Source :** Meylan et Musy (1999)

Ces différentes étapes de l'analyse fréquentielle ont permis d'établir un modèle de l'évolution des valeurs pluviométriques maximales dans le Nord-Bénin. Le but visé par cette analyse est de déterminer la fréquence d'occurrence des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin. Pour cela, la série des hauteurs maximales de pluie a été constituée.

Par ailleurs, deux lois statistiques ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques journaliers. Il s'agit de la loi de Gumbel et de la loi log-Pearson Type III.

#### ➤ **Constitution de la série des hauteurs maximales annuelles de pluies**

Pour constituer la série des hauteurs maximales de pluies, la méthode des valeurs extrêmes a été utilisée. Elle comporte les deux étapes suivantes :

- ❖ **1<sup>ère</sup> étape :** choix de la hauteur maximale journalière de pluies de chaque mois d'une année  $A$ , il est obtenu une série  $X$  de 12 hauteurs de pluie maximales pour cette année  $A$  ; l'opération est faite pour toutes les années  $N$  de la période 1951-2010, de manière à constituer la série des hauteurs maximales mensuelles ;

- ❖ **2<sup>ème</sup> étape** : choix de la plus grande hauteur au sein de la série  $X$  pour avoir la hauteur maximale de l'année. La même opération est reprise pour toutes les années  $N$  en vue d'obtenir la série  $Y$  des hauteurs de pluie maximales annuelles.

Dans le cadre de cette recherche, la série des hauteurs maximales annuelles représente les hauteurs de pluie les plus élevées qui ont été enregistrées dans une journée et pour chaque année de la période 1951-2010. La valeur minimale définie pour les hauteurs maximales varie d'une station à une autre et est comprise entre de 180 et 300 mm.

#### ➤ **Contrôle de la série des valeurs**

Le contrôle de la série des valeurs constituées a été fait avec le test d'auto-corrélation d'Anderson. Ce test a permis de vérifier l'homogénéité de cette série par la détermination du coefficient d'auto-corrélation d'Anderson (Ritschard, 2006). Ce coefficient a été calculé sur  $n$  paire de valeurs  $(x_1, x_2), (x_2, x_3), \dots, (x_{n-1}, x_n)$  et  $(x_n, x_1)$ . Pour une taille  $n = 60$  valeurs, le coefficient d'auto-corrélation suit une loi normale d'espérance mathématique  $E(R)$  et de variance  $VAR(R)$  :

$$E(R) \approx -\frac{1}{n-1} ; \quad VAR(R) \approx \frac{n-2}{(n-1)^2}$$

#### ➤ **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. Si elle est exponentielle, le choix porte sur la loi de Gumbel (Meylan et Musy, 1999). Les séries des hauteurs maximales annuelles rangées par ordre décroissant, montrent que ces valeurs décroissent rapidement. Cette décroissance étant de type exponentiel, le modèle de Gumbel est retenu comme modèle fréquentiel.

La loi de Gumbel est la forme de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de valeurs (Meylan et Musy, 1999). Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières. Sa distribution s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{1/c}\right]$$

Où  $a$  est le paramètre de position,  $b$  le paramètre d'échelle et  $c$  le paramètre de forme et  $x$  la variable ici les hauteurs de pluie.

#### ➤ **Ajustement du modèle fréquentiel**

La technique d'ajustement utilisée est une 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 est 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. Plusieurs méthodes existent pour ajuster les distributions statistiques aux échantillons. Dans le cadre de cette étude, la méthode maximum de vraisemblance a été utilisée pour ajuster les séries d'analyse à la loi de Gumbel et à la loi log-Pearson Type III.

#### ➤ **Contrôle de l'ajustement**

Le contrôle de l'ajustement est fait dans cette étude par l'examen visuel des graphiques représentatifs de l'ajustement réalisé.

#### **1.5.3.1.2. Analyse de la tendance des pluies extrêmes**

L'analyse de la tendance des pluies extrêmes sur la période 1951-2010 a été faite grâce à la méthode de régression linéaire. L'équation de la droite de tendance par cette méthode est exprimée par la fonction  $y = at + b$  où  $y$  est la valeur de la variable dont la tendance est recherchée,  $a$  est le coefficient de régression dont les signes positifs (+) ou négatifs (-) expriment respectivement l'évolution croissante et décroissante dans le temps  $t$  et  $b$ , une constante telles que :

$$a = \frac{(\sum t^2) - (\sum t)(\sum ty)}{N\sum t^2 - (\sum t)^2} \quad b = \frac{N(\sum yt) - (\sum t)(\sum y)}{N\sum t^2 - (\sum t)^2}$$

Ce type de fonction a l'avantage de proposer une représentation synthétique et dynamique de l'évolution des paramètres considérés (Wesselink, 2003 ; cité par Totin, 2005). Pour pallier les problèmes de significativité de la tendance, les tests non paramétriques de rang de Kendall et Spearman ont été utilisés.

### ➤ Test de corrélation de rang de Kendall

L'hypothèse nulle  $H_0$  de ce test est une absence de tendance entre les paramètres analysés (ici, le nombre de pluies extrêmes et le temps). Quant à l'hypothèse alternative, elle est celle de l'existence d'une tendance (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO, 1966 ; Lubes *et al.*, 1994 ; Ouédraogo, 2001 et Totin, 2005). Le test est réalisé à partir d'un comptage du nombre de paires  $P$  pour lesquelles  $x_j > x_i$  avec  $j > i$  pour  $i = 1, 2, \dots, n - 1$ . Le coefficient  $\tau$  du test de Kendall est calculé par la formule :

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1$$

Le coefficient  $\tau$ , pour un grand nombre d'observations  $N$  (ici  $N = 61$ ) et sous l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) d'indépendance de  $x_i$ , suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance  $\sigma_\tau^2$  exprimée par :  $\sigma_\tau^2 = \frac{2(N+5)}{9N(N-1)}$

En somme, après détermination de la probabilité  $\alpha_1$ , l'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau de signification  $\alpha_0$  (fixé dans ce travail à 0,05) selon que  $\alpha_1 > \alpha_0$  ou  $\alpha_1 < \alpha_0$ . L'ensemble des étapes méthodologiques a été accomplie à l'aide du logiciel Hydraccess 4.1.

### ➤ Test de rupture de stationnarité dans les stations

Le test de Pettitt a été souvent utilisé pour l'étude des variables hydrométéorologiques de l'Afrique en général (Hubert *et al.*, 1989 ; Paturel *et al.*, 1997 ; Demarée et Nicolis, 1990 ; Lubès *et al.*, 1994 ; Servat *et al.*, 1998 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoin Bardin, 2004).

Ce test, dérivé du test de Mann-Whitney (Pettitt, 1979), permet de tester deux échantillons d'une même série. A partir de deux échantillons  $x_1, x_2, \dots, x_t$  et  $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$  d'une même série  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , la statistique  $U$  compte le nombre de fois où un membre du premier groupe excède un membre du second groupe. Elle s'écrit :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ Avec } \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0, 0 \text{ si } x = 0 \text{ et } -1 \text{ si } x < 0.$$

Soit  $K_N$  la variable définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,n}$  pour  $t$  variant de  $n$  à  $n-1$ , si  $K_{max}$  désigne la valeur de  $K_n$  prise pour la série étudiée, sous l'hypothèse

nulle, la probabilité de dépassement de la valeur  $K_{max}$  est donnée approximativement par :

$$Prob(K_n > K_{max}) = 2 \exp\left(\frac{-6(K_{max})^2}{n^3 + n^2}\right)$$

Pour un risque donné de première espèce, si la probabilité est influencée à  $\alpha$ , l'hypothèse nulle est rejetée. Dans ce cas,  $t$  indique la rupture, mais cette date est purement indicatrice (Ouédraogo, 2001). En synthèse, les périodes d'avant et d'après les dates de ruptures servent à caractériser les phases humides et sèches et par conséquent les tendances, les écarts et les déficits pluviométriques ou hydrométriques. Les points de rupture ont été utilisés comme année pivot pour calculer les variations moyennes de la pluviométrie grâce à l'indice de déficit. Il a servi surtout à caractériser les variations moyennes de part et d'autre de la rupture pour les variables climatiques dont la série présente une rupture (Ouédraogo, 2001 ; Ardoin-Badin, 2004 ; Totin, 2005 ; Vissin, 2007 ; Totin, 2010 ; et Ogouwalé, 2013). L'identification des ruptures de stationnarité a été possible grâce à l'utilisation du logiciel Khronostat 1.01.

### ➤ **Loi de Pearson III**

La loi de Pearson III ou du Gamma incomplet est une loi statistique qui fixe, a priori, la valeur du paramètre de position  $x_0$  à zéro. En retenant toujours  $Q$  comme variable débit, et  $u = a \cdot Q$  comme variable réduite, avec  $a = 1/s$ , s'étant le paramètre d'échelle. Dans ces conditions, la fonction de répartition s'écrit:  $F(Q) = a\lambda / T(\lambda) \int e^{-aQ} \cdot Q^{\lambda-1} \cdot dQ$

Avec la limite supérieure est de  $Q$  et celle inférieure 0.

Avec  $\lambda$  est calculé à partir d'une fonction complexe :  $g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log Q_i / N$ .

## **CHAPITRE II**

### **FACTEURS GENERATEURS DES PLUIES EXTREMES DANS LE NORD-BENIN**

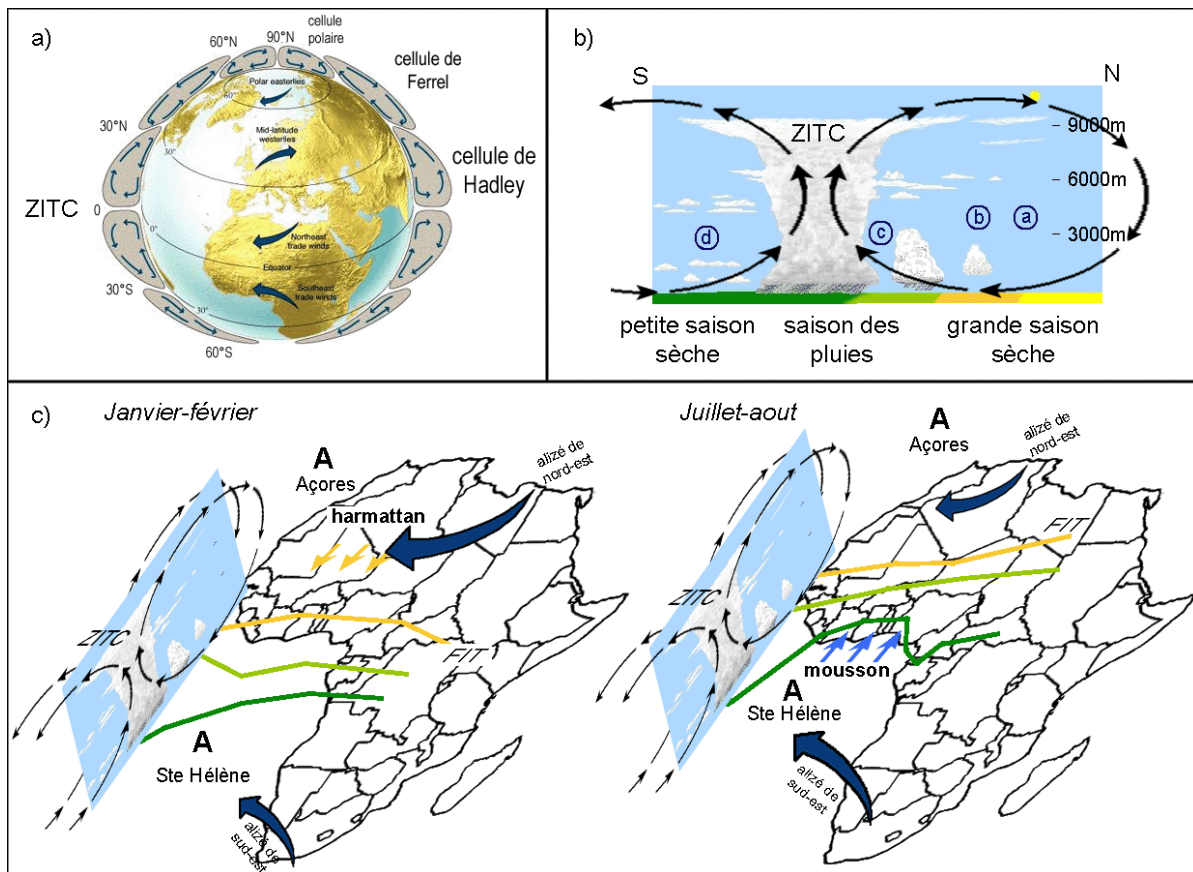
Ce chapitre présente les facteurs qui conditionnent les pluies extrêmes dans le secteur d'étude.

#### **2.1. Contexte climatique du Nord-Bénin**

L'Afrique de l'ouest se caractérise par des situations très contrastées en matière de climat. C'est ainsi que durant le XX<sup>e</sup> siècle, des périodes sèches et humides ont alterné en Afrique de l'Ouest (Hulme *et al.*, 2001). La récente sécheresse qui y sévit se caractérise par sa durée, son intensité et son extension.

Selon le modèle de circulation générale à 3 cellules convectives (figure 4a), le régime climatique de l'Afrique de l'ouest est déterminé par la cellule de Hadley (Gallée *et al.*, 1994 et 2001). Il s'agit d'une cellule thermique caractérisée par une expansion ascendante près de l'équateur météorologique et divergeant en altitude vers les pôles. Cette zone convective crée une région de basses pressions, appelée Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT).

En Afrique de l'ouest, elle est encadrée par les anticyclones des Açores et de Sainte Hélène, respectivement au nord et au sud de l'équateur météorologique. En réaction, des courants de subsidence appelés alizés, à 30° de latitude, convergent en surface vers l'équateur (figure 4b). Au niveau de la mer, les alizés se dirigent vers la zone très instable de convergence intertropicale. Dans leur trajet vers l'équateur, ils absorbent chaleur et humidité. Sous l'effet combiné de cette convergence et des nombreux courants convectifs de cette région, l'air humide et instable de la zone intertropicale est envoyé en altitude. D'importants cumulonimbus se développent, dont les sommets dépassent parfois la tropopause et atteignent 18 000 m (figure 4c).



**Figure 4 :** Circulation générale et mousson ouest africaine

**Source :** Lombry, 2000

La genèse de nombreux systèmes précipitant convectifs forme la "mousson africaine". La Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), particulièrement bien marquée sur la moitié occidentale de l'Afrique, sépare la mousson de sud-ouest, chaude et humide, de l'harmattan, vent saharien très sec. La mousson reste dans les basses couches, rejetant l'air saharien en altitude et créant ainsi une instabilité frontale appelée Front Inter Tropical (FIT). La position de la dépression équatoriale suit le mouvement apparent du soleil, il en résulte une oscillation saisonnière de la ZCIT autour de l'équateur géographique.

Sur le continent, la position de la ZITC marque la limite de pénétration de la mousson. Il existe un découplage entre les pluies maximales et la position en surface de la ZCIT. Bien que l'oscillation interannuelle de la ZCIT conserve une position relativement stable (étude sur 08 ans), celle des précipitations connaît des déplacements importants (Grist et Nicholson, 2001).

La connaissance des mécanismes climatiques à l'origine du flux de mousson permet de mieux appréhender la répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes à l'échelle continentale afin d'améliorer les connaissances sur la dynamique de ces pluies extrêmes à l'échelle régionale (Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Paturel *et al.*, 1997b ; Servat *et al.*, 1997a ; Olivry *et al.*, 1998 ; Laraque *et al.*, 2001 ; Ogouwalé, 2013).

## **2.2. Circulation atmosphérique et facteurs pluviogéniques du Nord-Bénin**

Les grands systèmes de circulation dans le Nord-Bénin sont constitués des cellules de Hadley et Walker, les vents d'altitude (Jet Tropical d'Est, Jet subtropical, Jet d'Est Africain) et par les centres isobariques (Açores, Sainte Hélène, Libye).

**Les cellules : la cellule de Hadley** anime la circulation méridienne dans la zone tropicale, notamment en Afrique occidentale. Elle comprend une branche ascendante proche de l'équateur et une branche subsidente aux latitudes subtropicales (20-30° de latitude). La branche ascendante correspond à l'Equateur Météorologique et la branche de subsidence correspond aux « centres anticycloniques ». L'énergie étant transférée en altitude (régions équatoriales), l'air refroidi dans la haute troposphère redescend et met en place les Hautes Pressions subtropicales. **La circulation divergente est-ouest** organise la circulation zonale (E-W), matérialisée dans les basses couches par l'alizé du S E et du N E, et, en altitude, par un axe de vents forts, les aérojets que sont les vents d'altitude.

**Les vents d'altitude : le « Jet Tropical d'Est » (JTE)** constitue la branche supérieure de la circulation divergente est-ouest. Ce sont des vents forts (16-17 m/s) à 100-200 hPa en juillet-août entre 5 et 10°N. Nées des contrastes thermiques du sud-est asiatique, les ondulations du JTE génèrent les lignes de grains. Un JTE fort signifie une circulation est-ouest renforcée sur l'Afrique de l'ouest et une plus forte pénétration de la mousson qui la réactive et vice versa (Houssou, 1998 ; Houndénou, 1999 ; Ouorou-Barrè, 2010).

### ➤ **FIT et pluies de mousson**

Le Front Intertropical (FIT), appelé aussi Front de Mousson (FM) au Bénin, a des aspects différents selon la latitude et le milieu considéré (océan, littoral, continent). Selon Houndénou (1999), le Bénin est régi par le FIT continental qui progresse vers le nord plus rapidement que son équivalent océanique.

En janvier, le FIT occupe la position la plus méridionale sur le littoral (vers 7°N). La partie du pays située au nord de cette position du FIT se trouve sous l'influence des conditions hivernales (harmattan). En février, les conditions atmosphériques ne varient pas, mais le front remonte vers le nord à la latitude d'Abomey-Kétou. Toutes les parties au sud de cette ligne sont soumises au flux de mousson.

En mars, le FIT est positionné à la latitude de Kandi-Kérou et en avril, il est au-delà du Bénin. A partir de cet instant, le régime de mousson est prépondérant dans tout le pays et dans l'Atacora : la chaleur est torride du fait de la forte insolation, des températures élevées et de la faible déperdition thermique liée à l'importante humidité atmosphérique. Le front demeure au nord de la région d'étude jusqu'en septembre.

Dès octobre, le FIT amorce son retour vers le sud et se situe à la pointe septentrionale du Bénin vers 12°30'N. En novembre, il se localise au sud de Natitingou-Bembèrèkè aux environs de 10°N en décembre. Il se fixe au sud de 8°N dans les environs de Dassa-Savè. Toutes les régions au nord de cette ligne se retrouvent sous l'influence du régime d'harmattan. Le FIT dans son déplacement SN et NS commande, en partie, les types de temps des différentes saisons (Afouda, 1990).

### ➤ **Période de forte chaleur**

Elle se manifeste en février, mars et avril, et est marquée par une élévation graduelle des températures maximales et plus encore minimales : la température maximale moyenne s'établit entre 34°C et 39°C et dépasse parfois 40°C, en avril au nord-est, plus précisément à Malanville. La température minimale moyenne se situe entre 20°C et 30°C. L'amplitude diurne reste importante (14°C - 16°C en avril) du fait de la forte insolation (8 - 9 heures par jour). Toutefois, il est noté aussi pendant le mois de février la présence de l'harmattan, froid tous les matins.

### ➤ **Période pluvieuse**

La saison des pluies s'étend de mai-juin à octobre et se caractérise par des pluies orageuses qui représentent environ 70 % des précipitations totales (Boko, 1988). La région d'étude est marquée par des manifestations orageuses, plus que dans le reste du pays, du fait des ascendances forcées d'air humide qu'occasionne la chaîne de l'Atacora (partie ouest du secteur d'étude) associées à une intense activité convective (Afouda, 1990). La saison des pluies comporte deux périodes, la période d'installation et la période des grandes pluies.

#### **Installation**

En mai-juin, avant l'arrivée des fortes pluies, le temps est caractérisé par les grandes chaleurs (30°C - 36°C de températures maximales moyennes), par un degré hygrométrique important (80 - 90 % d'humidité relative maximale), par une nébulosité croissante et par une insolation encore élevée (08 heures par jour en mai, 07 heures en juin). De telles conditions météorologiques favorisent la thermoconvection avec des orages brutaux, de courte durée, accompagnés de vent violent (08 à 20 m/s) mais qui donnent des précipitations modestes. Après les premières pluies, la fraîcheur s'installe, ce qui annonce le début de la saison pluvieuse (Afouda, 1990).

#### **Fortes pluies**

Elles s'étendent généralement de juillet à septembre-octobre. C'est la période où les précipitations sont bien établies et se caractérisent par une forte humidité (85-95 %), des températures maximales modérées (28°C - 30°C) en moyenne et une faible insolation (4 -7 heures par jour) (Afouda, 1990). La chaîne de l'Atacora, joue un rôle important dans la pluviométrie de la région. Elle catalyse le déclenchement des processus de condensation et de précipitation quand l'air saturé de vapeur et advecté arrive contre le relief. A l'ouest du secteur d'étude, les pluies diurnes constituent plus de la moitié du nombre total mensuel ou annuel de jours de pluie. Toujours dans cette partie du milieu d'étude, le nombre de jours de pluie en phase diurne fait plus des trois quart (3/4) du nombre total de jour de pluie (Houndénou, 1999).

### ➤ **JEA (ondes d'est) et pluies de lignes de grain**

Le « **Jet d'Est Africain** » (**JEA**), est un courant des couches moyennes situé entre 600-700 hPa. Spécifiquement ouest africain, il a une origine liée aux conditions locales car généré par le gradient thermique existant entre l'Atlantique au sud et les régions continentales africaines au nord. Il a une vitesse oscillant entre 13 et 24 m/s et atteint sa plus forte intensité en avril-mai et octobre-novembre sur le golfe de Guinée.

**Les centres isobariques** : trois centres, dont deux permanents : l'anticyclone des Açores (25°N en hiver, 30°N en été) dans l'Atlantique nord et celui de Sainte-Hélène (20°S en hiver, 15°S en été) dans l'Atlantique sud. Le troisième semi-permanent de la Libye intervient aussi dans la dynamique atmosphérique.

En hiver boréal et précisément en janvier-février, les centres de pression occupent une position très méridionale car renforcés par les incursions polaires boréales et le refroidissement de l'ensemble de l'hémisphère nord : « l'anticyclone des Açores » est renforcé avec, en son centre, un maximum de pression de 1020 hPa. En hiver, l'Afrique boréale enregistre un déficit énergétique relatif ; on a alors un fort refroidissement de la partie nord du continent africain, un refroidissement du centre anticyclonique des Açores et la mise en place de celui de l'Égypte-Libye. Les deux centres se soudent par la suite (Houssou, 1998 ; Houndénou, 1999 ; Ouorou-Barrè, 2010). Au même moment, les hautes pressions de Sainte-Hélène, dans l'océan Atlantique, au large de l'Afrique du Sud et de la Namibie, ne sont plus très actives et n'ont plus une influence directe sur l'Afrique Occidentale, du fait de l'été au cours duquel l'anticyclone n'est pas renforcé par les incursions polaires australes.

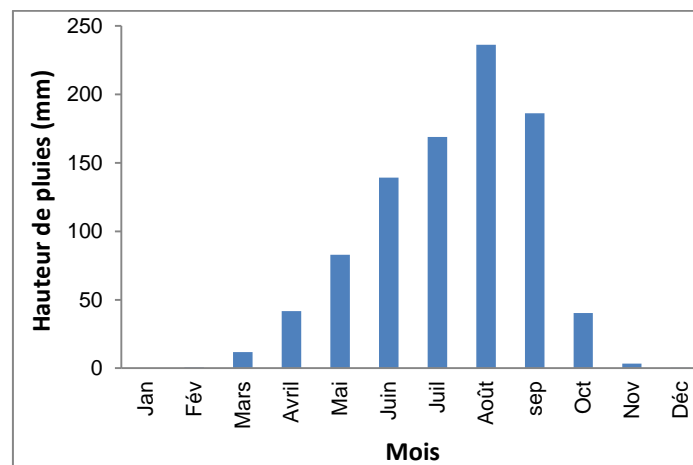
En altitude, il est noté la prédominance, en hiver boréal, de l'anticyclone des Açores sur celui de Sainte-Hélène à 850 hPa. Cette position du champ de pression en surface, développe en Afrique Occidentale un flux, de NE d'origine saharienne, chaud et sec : c'est l'harmattan.

En été boréal, le réchauffement du continent au nord de l'équateur provoque, la rétraction du centre des hautes pressions des Açores et la mise en place de la dépression saharienne qui succède aux hautes pressions égypto-libyennes. Ce centre de basses pressions thermiques favorise la remontée de la ZCIT (Zone de Convergence

Inter-Tropicale) ou (Equateur météorologique) propulsée aussi par l'anticyclone de Sainte-Hélène, plus actif et plus dynamique car renforcé par le refroidissement hivernal de l'ensemble de l'hémisphère sud et par les coulées polaires australes. Il est alors caractérisé, en son centre, par un maximum moyen de pression de 1022 hPa et il se situe plus près de l'Equateur. La dépression thermique du Sahara en surface se trouve surmontée par une zone anticyclonique. Tout cet ensemble favorise la pénétration sur l'Afrique Occidentale du flux du sud-ouest, la mousson, génératrice de pluies.

### 2.2.1. Régime pluviométrique

Le type de climat qui règne dans la région d'étude est déterminé à travers les fondements aérologiques et géographiques. Ainsi, il est qualifié du climat soudanien (tropical), avec deux grandes saisons : une saison pluvieuse et une saison sèche (figure 5) qui rythment la vie et les activités humaines.



**Figure 5 :** Régime pluviométrique moyen mensuel sur la période 1951-2010 dans les stations synoptiques (Parakou, Natitingou et Kandi) du Nord-Bénin

Les totaux moyens mensuels sur la série trentenaire 1951-2010 montrent que le secteur d'étude a un régime pluviométrique unimodal. Le mois humide correspond au mois où le total mensuel est supérieur ou égal à 8,5 % du total annuel (Boko, 1988 et Afouda, 1990). Les mois d'août et septembre sont les plus humides sur la série d'étude.

La saison des pluies de mai à octobre voit la prédominance des flux de mousson d'ouest à sud-ouest mais ceux liés aux lignes de grains sont génératrices de fortes averses sur la région (Boko, 1988). La saison sèche comprend deux périodes, la

période de l'harmattan (novembre-février) et celle de forte chaleur (mars-avril) relativement chaude le jour, desséchant et accélérant le dépérissement de la végétation. La succession des saisons est due aux mécanismes climatiques observés en Afrique de l'ouest en général.

En outre, la période d'harmattan est caractérisée par l'alizé continental, la brume sèche et la baisse des températures, comme dans les régions sahéliennes mais à très faible degré. A la suite d'une forte extension de l'anticyclone libyen, le FIT peut être rejeté au sud des côtes du Bénin. En effet, l'incursion d'une poussée polaire boréale crée un gonflement de l'anticyclone nord-africain. Et le renforcement brusque du flux d'est et du nord-est qui repousse le FIT vers le sud. Ce sont les poussées d'harmattan ou 'surges'. Le régime d'harmattan est alors exacerbé sur les régions ouest-africaines, balayées par l'alizé continental. D'autre part, il arrive qu'un tel renforcement entraîne aux bords méridionaux du FIT des manifestations pluvio-orageuses : pendant la descente forcée du FIT vers le sud, sous l'effet de la poussée du flux continental, il y a convergence par accélération du courant et aussi la mousson est soulevée. Des phénomènes orageux se mettent alors en place au sein de la mousson (Leroux, 1970), cité par Houssou (1998). Ce sont ces pluies de saison sèche qu'on appelle "pluies des mangues" et qui sont même attendues entre janvier et mars, du fait qu'elles favorisent la maturation des mangues.

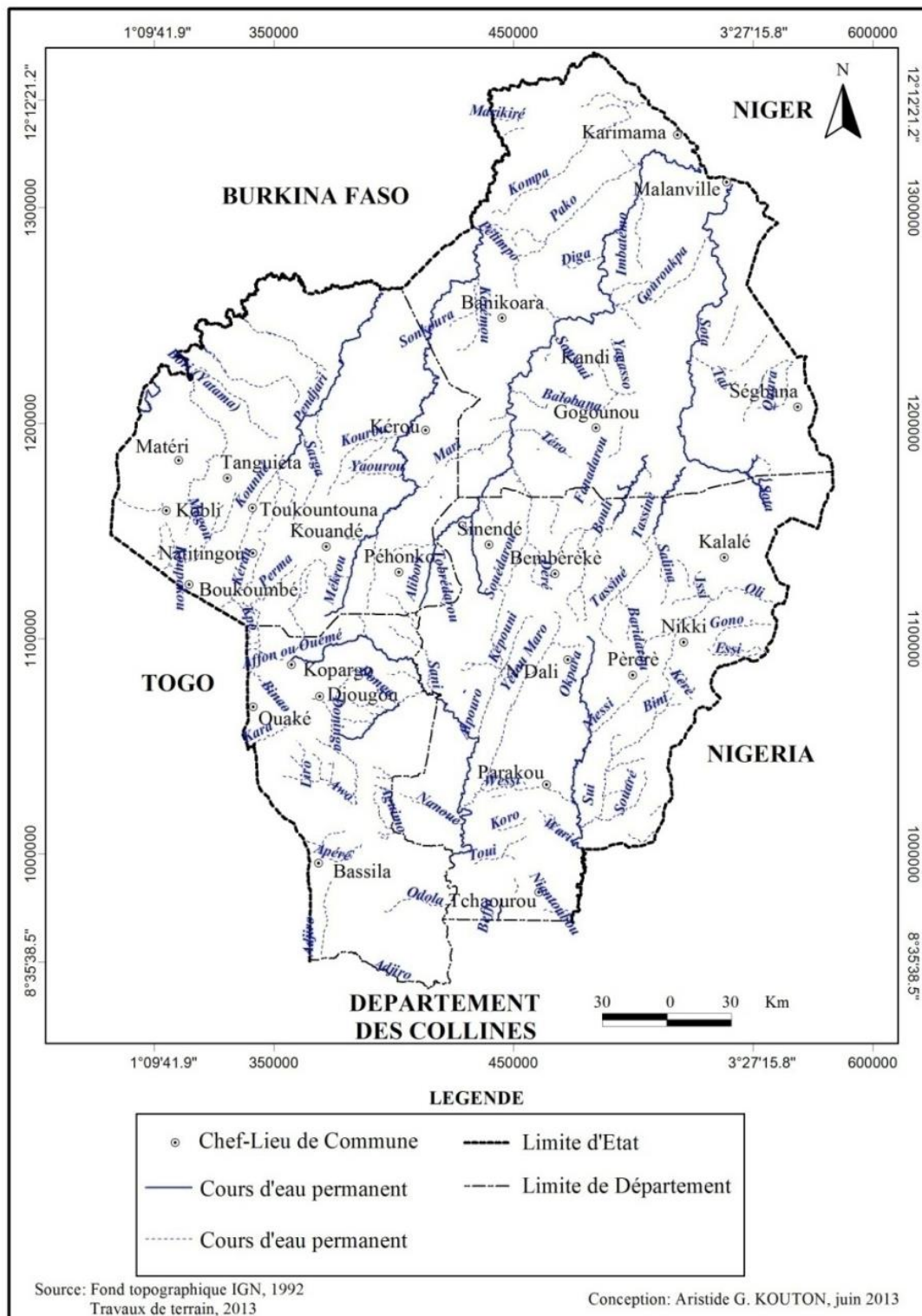
Ces fluctuations de l'harmattan seraient liées aux expulsions d'air polaire boréal (Houndénou, 1999) et aux gradients barométriques existant entre 20°N et 10°N. A la suite de ces pluies, l'alizé du nord-est s'installe.

La conséquence de cette ambiance climatique est que dans le paysage tout jaunit, les herbacées se dessèchent rapidement ; les nappes phréatiques et le niveau d'eau des cours d'eau diminuent.

### **2.2.2. Réseau hydrographique du Nord-Bénin**

Le fleuve Niger constitue la frontière entre le Nord-Bénin et le Niger sur 135 km. Son bassin versant couvre, dans le Nord-Bénin environ 1.000.000 km<sup>2</sup> (Vissin, 2007). Sur ce court parcours, le Niger a un tracé rectiligne orienté NW-SE et reçoit sur sa rive droite trois importants affluents béninois qui sont, d'ouest en est : la Mékrou, l'Alibori

et la Sota (figure 6).



**Figure 6 : Réseau hydrographique du Nord-Bénin**

Les méandres et les coudes brusques des cours d'eau du Nord-Bénin sont très nombreux et le plus souvent d'origine structurale. Les lits pour la plupart sont encombrés de nombreux rochers (Vissin, 2007).

# CHAPITRE III

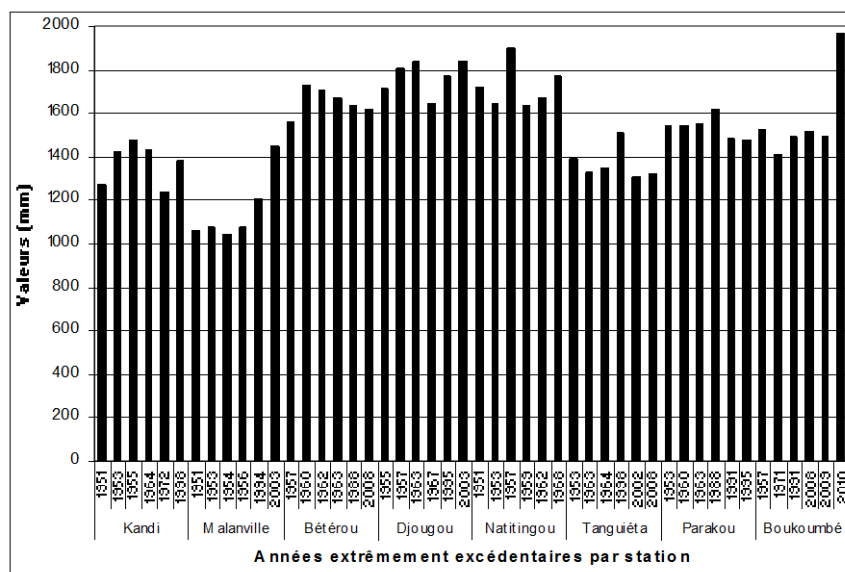
## CARACTERISTIQUES DES PLUIES EXTREMES AUX ECHELLES ANNUELLES ET SAISONNIERES

Les caractéristiques des pluies extrêmes varient aussi bien à l'échelle annuelle que saisonnière.

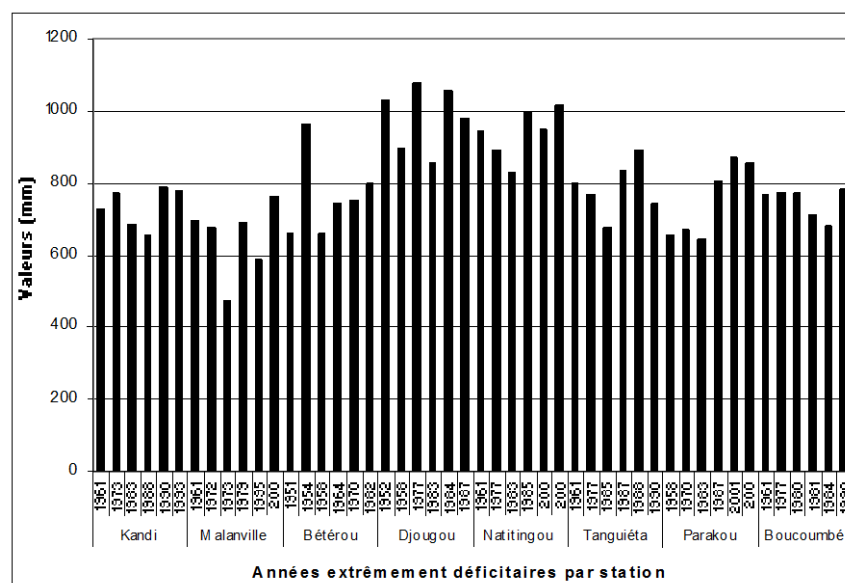
### 3.1. Pluies extrêmes annuelles

#### 3.1.1. Années extrêmement déficitaires et excédentaires

Les valeurs des pluies extrêmes excédentaires et déficitaires annuelles sur la période d'analyse varient d'une station à une autre et d'une année à une autre (figures 7 et 8).



**Figure 7 :** Années extrêmement excédentaires par station



**Figure 8 :** Années extrêmement déficitaires par station

L'examen des figures 7 et 8 permet de déduire dans un premier temps que les valeurs les plus élevées des pluies extrêmes excédentaires annuelles sont recensées au sud-ouest du secteur d'étude. En effet, les stations au niveau desquelles ces valeurs sont obtenues sont entre autres Boukoumbé, Natitingou, Djougou et Tanguiéta. Cet état de chose peut s'expliquer par la présence dans cette partie du Nord-Bénin des reliefs élevés au Bénin.

En outre, la région d'étude présente des contrastes pluviométriques forts, principalement contraints par le relief. On trouve ainsi les cumuls pluviométriques les plus importants au sud-ouest du secteur d'étude. Ce qui permet de dire que la morphométrie du relief explique un peu plus d'un tiers de la distribution spatiale des pluies extrêmes excédentaires au Nord-Bénin.

Par ailleurs, il faut remarquer que la répartition des extrêmes déficitaires s'est effectuée dans le temps, de nord-nord-est vers le sud-ouest dans le secteur d'étude. En effet, les communes de Malanville et Kandi sont les communes où ces extrêmes déficitaires sont plus prononcés avec respectivement 472,2 et 551,1 mm/an. Le tableau II fait une synthèse des années pluviométriques extrêmes dans le Nord-Bénin sur la période d'analyse.

**Tableau II :** Synthèse des années pluviométriques extrêmes dans le Nord-Bénin

<b>Années extrêmement excédentaires</b>	<b>Années extrêmement déficitaires</b>
1951 ; 1953 ; 1954 ; 1955 ; 1956 ; 1957 ;	1951 ; 1952 ; 1954 ; 1958 ; 1961 ; 1964 ;
1959 ; 1960 ; 1962 ; 1963 ; 1964 ; 1967 ;	1970 ; 1972 ; 1973 ; 1977 ; 1979 ; 1980 ;
1968 ; 1971 ; 1972 ; 1988 ; 1991 ; 1994 ;	1981 ; 1982 ; 1983 ; 1984 ; 1985 ; 1987 ;
1995 ; 1998 ; 2002 ; 2003 ; 2008 ; 2009 ;	1988 ; 1990 ; 1993 ; 1995 ; 2000 ; 2001 ;
2010	2004 ; 2005 ; 2006

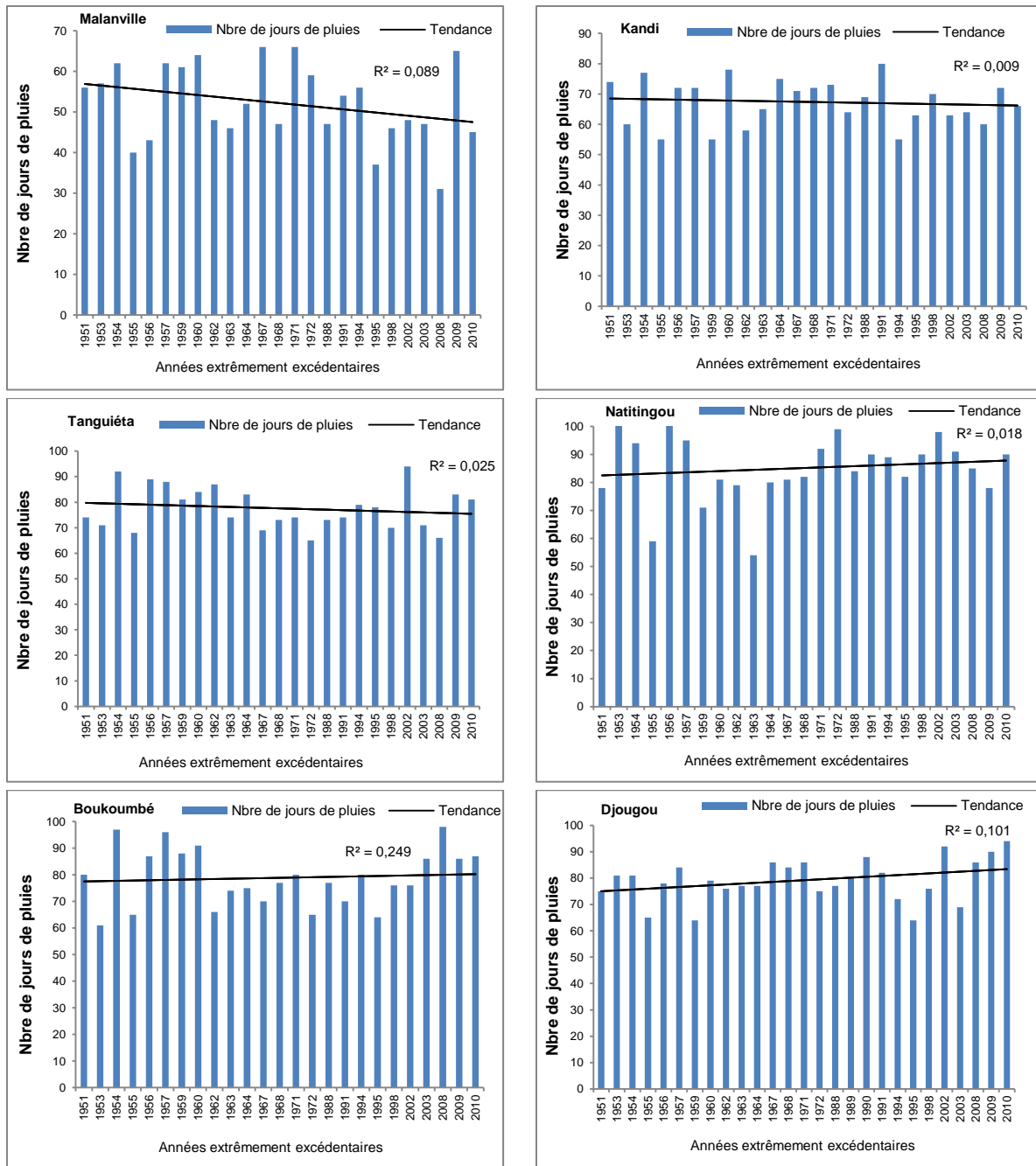
**Source :** Traitement des données, décembre 2013

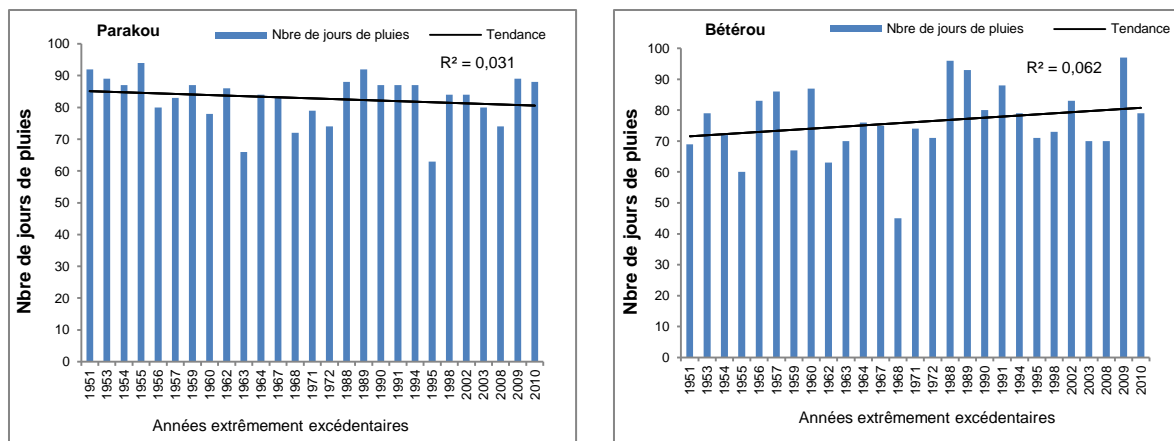
De l'analyse des données de ce tableau, il ressort que 25 années ont enregistré des pluies extrêmes excédentaires contre 27 années extrêmement déficitaires sur la période 1951-2010. Toutefois, il faut signaler que cinq (05) années sont communes à ces deux catégories. Il s'agit entre autres des années 1951, 1954, 1972, 1988 et 1995. Cet état de chose se justifie par le fait que les événements extrêmes ont eu lieu dans plusieurs stations au cours de ces années. Les quatorze (14) années restantes (1965, 1966, 1969, 1974, 1975, 1976, 1978, 1986, 1989, 1992, 1996, 1997, 1999 et 2007) peuvent être

considérées comme des années normales car n'ayant enregistrées ni de pluies extrêmement déficitaires ni de pluies extrêmement excédentaires.

### 3.1.2. Nombre de jours de pluie et relation avec les années extrêmement excédentaires

Les figures 9 et 10 montrent l'évolution du nombre de jours de pluies en fonction des années extrêmement excédentaires et déficitaires dans la région d'étude de 1951 à 2010.

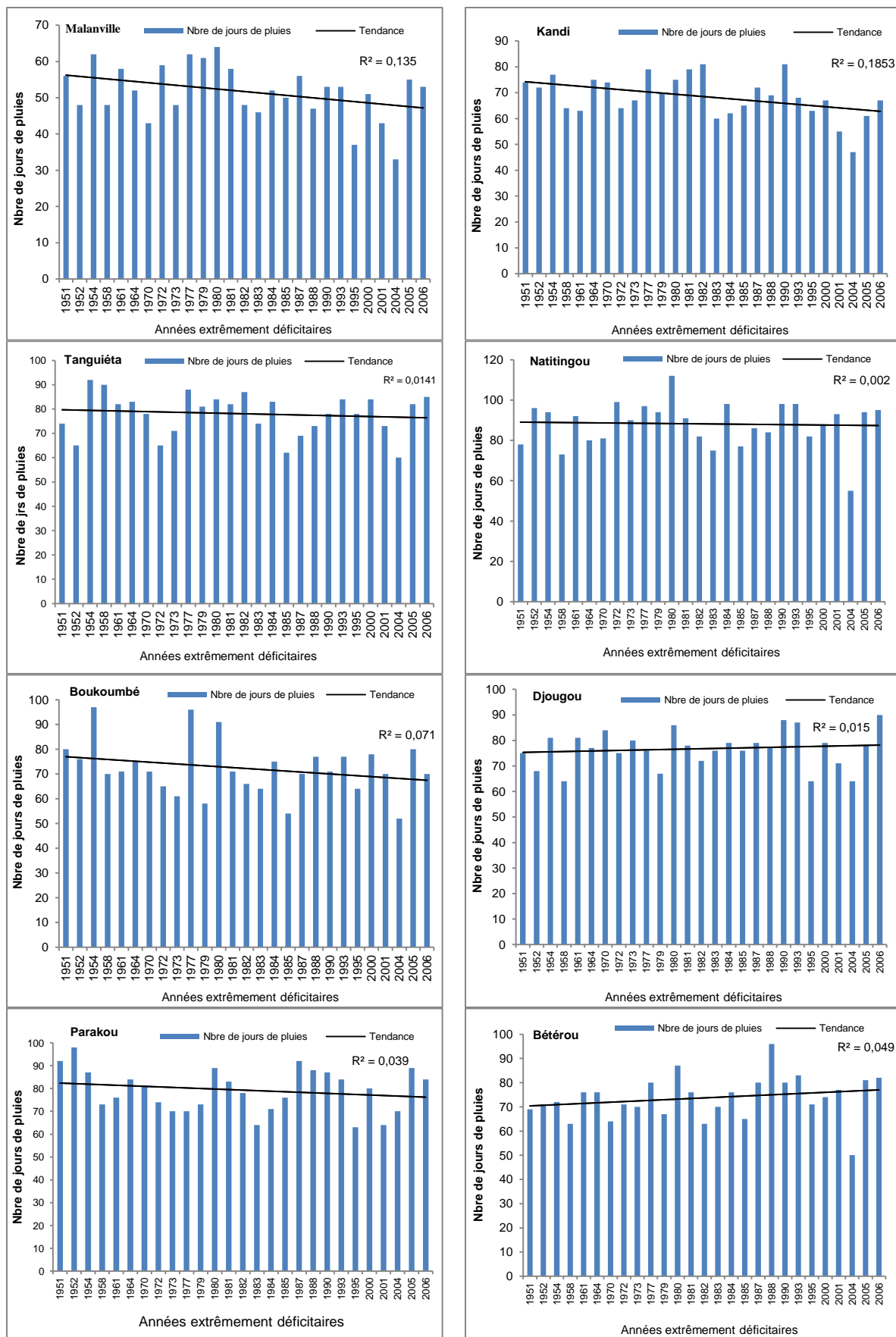




**Figure 9 :** Evolution du nombre de jours de pluies en fonction des années extrêmement excédentaires sur la période 1951-2010 (Source des données : ASECNA, novembre 2013)

Il ressort de l'analyse de la figure 9 que le nombre de jours de pluies a connu globalement une baisse de 28,75 % au cours des années extrêmement excédentaires sur l'ensemble des stations retenues dans le cadre de cette étude. Les baisses les plus significatives sont enregistrées au niveau des stations de Malanville, Kandi, Tanguiéta, et Parakou avec des coefficients de corrélation respectifs de 89 %, 10 %, 25 % et 31%. Par contre, il a été constaté une hausse sensible (16,8 %) du nombre de jours de pluies dans les stations de Bétérou, Djougou, Boukoumbé et Natitingou avec des coefficients de corrélation respectifs de 52 %, 10 %, 24,9 % et 18 %.

En outre, il a été noté une différence du nombre de jours de pluies entre les différentes stations du secteur d'étude. En effet, dans les stations de Kandi et Malanville au nord-est du secteur d'étude, le nombre moyen de jours de pluies au cours des années extrêmement excédentaires sont respectivement de 67 et 52 jours. Par contre, ils sont de 79, 80, 83 et 85 respectivement dans les stations de Boukoumbé, Parakou, Djougou et Natitingou au sud-ouest. Mieux, l'analyse de la tendance des hauteurs de pluies dans les différentes stations retenues dans le cadre de cette étude permet de noter une tendance globale à la hausse des hauteurs de pluies maximales au sein de la chronique analysée, mais, avec quelques nuances d'une station à une autre. Au niveau des stations de Djougou, Parakou, Boukoumbé et Natitingou, la hausse est significative. Par contre, dans les autres stations, elle est presque stationnaire. Il peut donc être conclu que la survenance des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin n'est pas que liée au nombre de jours de pluies.



**Figure 10 :** Evolution du nombre de jours de pluies en fonction des années extrêmement déficitaires sur la période 1951-2010 (Source des données : ASECNA, novembre 2013)

De l'analyse de cette figure, il faut noter que le nombre de jours de pluies a connu globalement une baisse de 52,1 % au cours des années extrêmement déficitaires sur l'ensemble des stations retenues dans le cadre de cette étude.

Il faut faire remarquer aussi que dans presque toutes les stations, la diminution du nombre de jours de pluies est en phase avec le nombre d'événements pluvieux extrêmes. Il ressort donc que les déficits de pluies extrêmes enregistrés au cours des années extrêmement déficitaires sont dus en partie à la réduction du nombre de jours pluvieux associée à la faible hauteur de pluies journalière enregistrée. Ce qui permet de dire que, il pleut moins mais la quantité d'eau enregistrée demeure toujours importante.

Au total, les facteurs déterminants de la variation spatiale des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin sont la latitude et l'altitude (orographie).

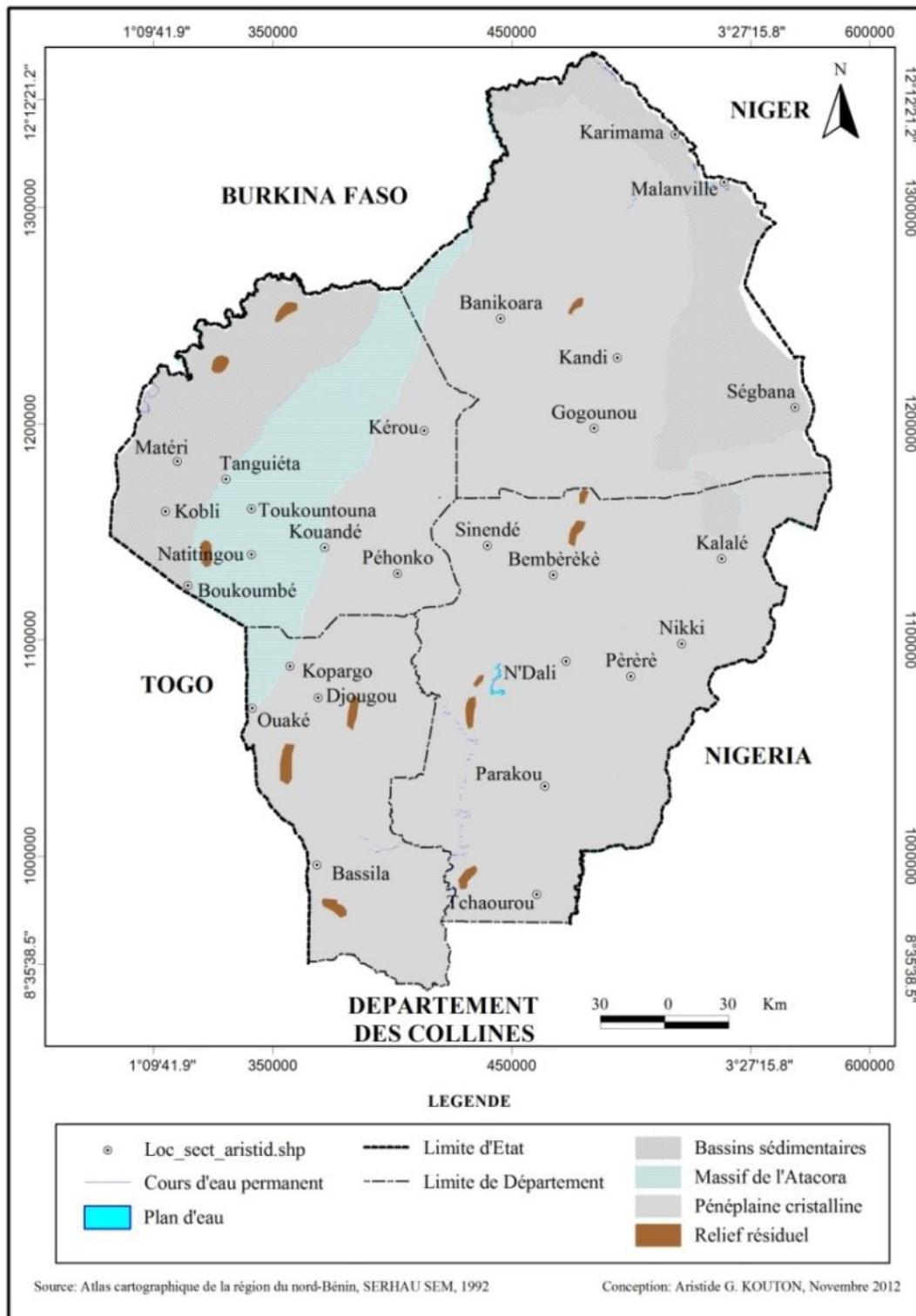
### **3.1.3. Tentatives d'explication de la répartition des pluies extrêmes annuelles**

La variabilité pluviométrique interannuelle au Nord-Bénin est très marquée par une certaine différence spatiale pour des raisons topographiques complexes. Cette variabilité s'explique par le fait que la région est soumise dans sa partie ouest à l'effet du relief. Selon Diem (2003), le relief agit sur la répartition spatiale des précipitations à plusieurs échelles spatiales, qui peuvent être considérées comme des échelles opérationnelles. En effet, le modelé du Nord-Bénin est composé de trois grands ensembles de formes de relief que sont, du sud-ouest au nord-est :

- ★ la chaîne de l'Atacora ;
- ★ le rebord Ouest de la chaîne de l'Atacora (pénéplaine) formée de petites collines à fortes pentes ;
- ★ la plaine de Gourma.

A la hauteur de Toukountouna, la chaîne de l'Atacora donne deux chaînons qui encadrent la haute plaine. Celle-ci (la haute plaine) s'élargit et s'incline de 400 m à moins de 200 m du sud-ouest vers le nord-est. La largeur de cette chaîne est orientée Nord-Nord-Est /Sud-Sud-Ouest. Il faut noter que cette forme de relief (figure 11) dans

cette partie du secteur d'étude a plusieurs incidences sur la répartition des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin.



**Figure 11:** Faciès géomorphologiques du Nord-Bénin

L'analyse de cette figure permet de constater que la répartition spatiale des précipitations dans le secteur d'étude fait apparaître un contrôle important par le relief

dans sa partie ouest. Houndénou (1999) a fait remarquer une certaine instabilité temporelle des relations relief et précipitations dans cette partie du secteur d'étude. Cette instabilité apparaît à deux niveaux de temps : à l'intérieur de la saison des pluies et entre les années. Elle se manifeste dans certains cas par un affaiblissement du contrôle par le relief, notamment à certaines phases du cycle saisonnier (début de la saison des pluies de mai-juin), attribué au développement de phénomènes convectifs locaux selon Afouda (1990). Dans d'autres cas, il apparaît qu'alternent d'une année à l'autre, plusieurs modèles de répartition des précipitations en fonction du relief.

En résumé, la topographie du Nord-Bénin est parsemée au sud d'une multitude de collines isolées (Collines de Bembéréké, de Sinendé, de Nikki et Kalalé). Ces collines, quoique peu élevées, constituent le trait majeur de la topographie des sous bassins du Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè (Le Barbe *et al.*, 1993 ; Vissin, 2007). Malgré leur altitude modeste, ces formes de reliefs accroissent, en effet, le réchauffement diurne, perturbent les courants, aggravent la turbulence et favorisent l'ascendance des masses d'air (Afouda, 1990). Leur présence explique l'importance accrue des manifestations orageuses dans le secteur d'étude (Agli, 1995). Le relief du Nord-Bénin joue alors un rôle prépondérant dans la répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes annuelles.

### **3.2. Pluies extrêmes saisonnières**

Les pluies extrêmes relèvent en général de manifestations pluvieuses à caractère exceptionnel. Elles se réfèrent soit à une pluie journalière qui a donné lieu à une quantité d'eau rarement enregistrée au cours d'une journée ; soit à des jours successifs de pluies continues ; soit encore à des hauteurs quasi nulles enregistrées sur plusieurs jours au cours d'une saison de pluie.

#### **3.2.1. Extrêmes saisonniers déficitaires et excédentaires**

Les tableaux III et IV montrent la répartition des extrêmes saisonniers excédentaires et déficitaires suivant chaque station du milieu d'étude.

**Tableau III:** Fréquences des extrêmes saisonniers en temps de pluies

Stations	Saison des pluies													
	Extrêmes saisonniers excédentaires								Extrêmes saisonniers déficitaires					
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	
Kandi	Nombre d'événements	7	13	32	50	28	1		40	16	6	0	8	57
	Pourcentage (%)	11,7	21,7	53,3	73,3	46,7	1,7		66,7	26,7	10,0	0,0	13,3	95,0
Malanville	Nombre d'événements	2	11	38	47	31	0		52	28	5	2	11	59
	Pourcentage (%)	3,3	18,3	63,3	68,3	51,7	0,0		86,7	46,7	8,3	3,3	18,3	98,3
Tanguiéta	Nombre d'événements	1	5	19	38	37	2		46	27	10	5	4	50
	Pourcentage (%)	1,7	8,3	31,7	63,3	61,7	14		76,7	45	16,7	8,3	3,4	18,6
Djougou	Nombre d'événements	1	7	33	32	24	2		41	25	5	10	5	44
	Pourcentage (%)	1,7	11,7	55	53,3	40	3,3		68,3	41,7	8,3	16,7	8,3	73,3
Parakou	Nombre d'événements	7	17	22	26	30	1		37	22	16	8	6	43
	Pourcentage (%)	11,7	28,3	36,7	43,3	50,0	1,7		61,7	36,7	26,7	13,3	10,0	71,7
Bétérou	Nombre d'événements	3	15	19	27	27	3		28	20	21	9	6	46
	Pourcentage (%)	5	1,7	31,7	45	45	5		46,7	33,3	35	15	10	76,7
Boukoubé	Nombre d'événements	3	3	22	63	41	1		46	29	14	2	3	45
	Pourcentage (%)	5	5	36,7	85	68,3	1,7		76,7	48,3	23,3	3,3	5	75
Natitingou	Nombre d'événements	1	9	20	44	37	2		41	30	12	3	5	47
	Pourcentage (%)	1,7	15,0	33,3	73,3	61,7	3,3		68,3	50,0	20,0	5,0	8,3	78,3

Source : Traitement des données, janvier 2014

Il ressort de l'analyse des données du tableau III qu'en saison pluvieuse, le mois d'août constitue le mois où l'on enregistre 68 % des extrêmes saisonniers suivi du mois de septembre (22 %) et de juillet (10 %). Selon Boko (1988), la saison des pluies s'étend de mai-juin à octobre et se caractérise par des pluies orageuses qui représentent environ 70 % des précipitations totales du Nord-Bénin. Cet état de chose se justifie par le fait que la région d'étude est marquée par des manifestations orageuses, plus que dans le reste du pays, du fait des ascendances forcées d'air humide qu'occasionne la chaîne de l'Atacora (partie ouest du secteur d'étude) associées à une intense activité convective (Afouda, 1990).

Par ailleurs, il faut signaler que les extrêmes déficitaires en saison pluvieuse s'observent généralement en début et en fin de cette dernière. Ces extrêmes s'obtiennent en mois de mai et octobre. Toutefois, le mois d'octobre enregistre 67 % des extrêmes déficitaires les plus élevés contre 13 % pour le mois de mai. Cet état de chose peut s'expliquer par le fait que dès le mois d'octobre, on enregistre l'amorce du retour du FIT vers le sud qui se situe à la pointe septentrionale du Bénin vers 12°30'N (Afouda, 1990). Il faut noter que le FIT dans son déplacement SN et NS commande, en partie, les types de temps des différentes saisons ; ce qui permet d'enregistrer les résultats observés dans le tableau IV.

**Tableau IV:** Fréquences des extrêmes saisonniers en saison sèche

Stations	Saison sèche														
	Extrêmes saisonniers excédentaires								Extrêmes saisonniers déficitaires						
	Janvier	Février	Mars	Avril	Novembre	Décembre		Janvier	Février	Mars	Avril	Novembre	Décembre		
Kandi	Nombre d'événements	0	2	10	41	0	0		59	52	28	4	57	57	
	Pourcentage (%)	0	3,3	16,7	68,3	0	0		98,3	86,7	46,7	6,7	95,0	95,0	
Malanville	Nombre d'événements	0	3	7	36	1	0		0	0	0	0	0	0	
	Pourcentage (%)	0	5	11,7	60,0	1,7	0		0	0	0	0	0	0	
Tanguiéta	Nombre d'événements	0	3	21	54	6	2		60	51	19	0	42	52	
	Pourcentage (%)	0	5	35	90	10	3,3		100	85	31,7	0	70	86,7	
Djougou	Nombre d'événements	0	3	13	51	2	2		51	39	13	0	46	46	
	Pourcentage (%)	0	5	21,7	85,0	3,3	3,3		85	65	21,7	0	76,7	76,7	
Parakou	Nombre d'événements	2	7	27	54	4	3		54	47	14	0	48	53	
	Pourcentage (%)	3,3	11,7	45,0	90,0	6,7	5		90	78,3	23,3	0	80	88,3	
Bétérou	Nombre d'événements	3	6	25	50	6	4		50	45	15	1	45	53	
	Pourcentage (%)	5	10	41,7	83,3	10	6,7		83,3	75	25	1,7	75	88,3	
Boukoubé	Nombre d'événements	0	2	16	47	3	4		57	51	21	3	32	54	
	Pourcentage (%)	0	3,3	26,7	78,3	5	6,7		95	85	35	5	53,3	90	
Natitingou	Nombre d'événements	1	1	18	55	9	1		57	50	16	0	39	55	
	Pourcentage (%)	1,7	1,7	30	91,7	15	1,7		95	83,3	26,7	0	65	91,7	

Source : Traitement des données, janvier 2014

L'analyse des données du tableau IV montre que les extrêmes excédentaires de la saison sèche s'obtiennent à 79 % en mois d'avril suivi immédiatement du mois de mars (09 %). En effet, ces mois sont sujets dans le Nord-Bénin de la manifestation de la chaleur qui est marquée par une élévation graduelle des températures maximales et plus encore minimales (Afouda, 1990) : la température maximale moyenne s'établit entre 34°C et 39°C et dépasse parfois 40°C, en avril au nord-est, plus précisément à Malanville. En mars-avril, période qui coïncide avec le début de la saison des pluies dans le secteur d'étude, il est noté la remontée de la mousson qui apporte déjà de l'humidité, ce qui donne naissance aux pluies de thermoconvection.

Par ailleurs, les extrêmes déficitaires de cette même saison sont obtenus en mois de janvier (76 %) et décembre (11,6 %). En effet, déjà en décembre, le FIT se localise au sud de Natitingou-Bembèrèkè aux environs de 10°N (Boko, 1988). Toutes les régions au nord de cette ligne se retrouvent déjà sous l'influence du régime d'harmattan ; ce qui justifie cette répartition des extrêmes déficitaires de la saison sèche.

### **3.2.2. Tentatives d'explication de la fréquence des extrêmes saisonniers**

Le nord-ouest du secteur d'étude enregistre plus d'événements pluvieux extrêmes que la partie est. Ceci pouvait s'expliquer par le fait qu'à l'ouest la chaîne de l'Atacora joue un rôle important dans la pluviométrie de la région. Elle catalyse le déclenchement des processus de condensation et de précipitation quand l'air saturé de vapeur et advecté arrive contre le relief. En ce moment, les pluies diurnes constituent plus de la moitié du nombre total mensuel ou annuel de jours de pluies. Toujours dans cette partie du milieu d'étude, le nombre de jours de pluies en phase diurne fait plus des trois quart (3/4) du nombre total de jours de pluies (Houndénou, 1999).

Par ailleurs, il est remarqué que la fréquence d'occurrence de pluies extrêmes aussi bien saisonnières qu'annuelles est plus forte au sud-ouest de la région d'étude. Par contre, les extrêmes déficitaires sont plus intenses à l'est de cette région d'étude.

## CHAPITRE IV

### EXTREMES PLUVIOMETRIQUES A L'ECHELLE JOURNALIERE

Ce chapitre est consacré à l'analyse des comportements des extrêmes pluviométriques à l'échelle journalière. Il s'intéresse également à l'estimation de la période de retour des extrêmes journaliers positifs et négatifs sur la période 1951-2010 dans le Nord-Bénin.

#### 4.1. Valeurs record des pluies journalières

Les valeurs "record" (plus forte valeur) des pluies journalières sont synthétisées dans le tableau V qui montre leur répartition dans le temps et dans l'espace et leurs dates d'avènement suivant les stations.

**Tableau V** : Valeurs record des pluies journalières dans le Nord-Bénin et leurs dates d'avènement

Stations	Valeurs "record" journalières (mm)	Dates
Malanville	127,6	22 août 2010
Kandi	134,4	13 août 1959
Tanguiéta	128,3	15 août 1988
Boukoubé	159,9	27 septembre 2010
Natitingou	147,7	17 août 2002
Parakou	139,3	14 septembre 1954
Djougou	142,2	23 août 2008
Bétérou	134,6	08 septembre 2003

**Source des données:** ASECNA, décembre 2013

La remarque majeure qui se dégage de l'examen du tableau V est que les années des valeurs "record" journalières coïncident à 98 % avec les années extrêmement excédentaires à l'échelle annuelle. Les plus fortes valeurs sont enregistrées au niveau des stations du sud-ouest et les plus faibles au nord-est du secteur d'étude. Entre la plus forte valeur (159,9 mm à Boukoubé) et la plus faible (127,6 à Malanville), il est noté une différence de 32,3 mm. Mieux, En dehors des stations de Boukoubé, Parakou et Bétérou, toutes les autres stations ont enregistré leur plus forte valeur au cœur du mois d'août, ce qui confirme l'influence prépondérante du FIT et des lignes de grain sur l'abondance des pluies journalières au Nord-Bénin. C'est donc au cours

des mois d'août et de septembre que surviennent les pluies extrêmes dans le secteur d'étude.

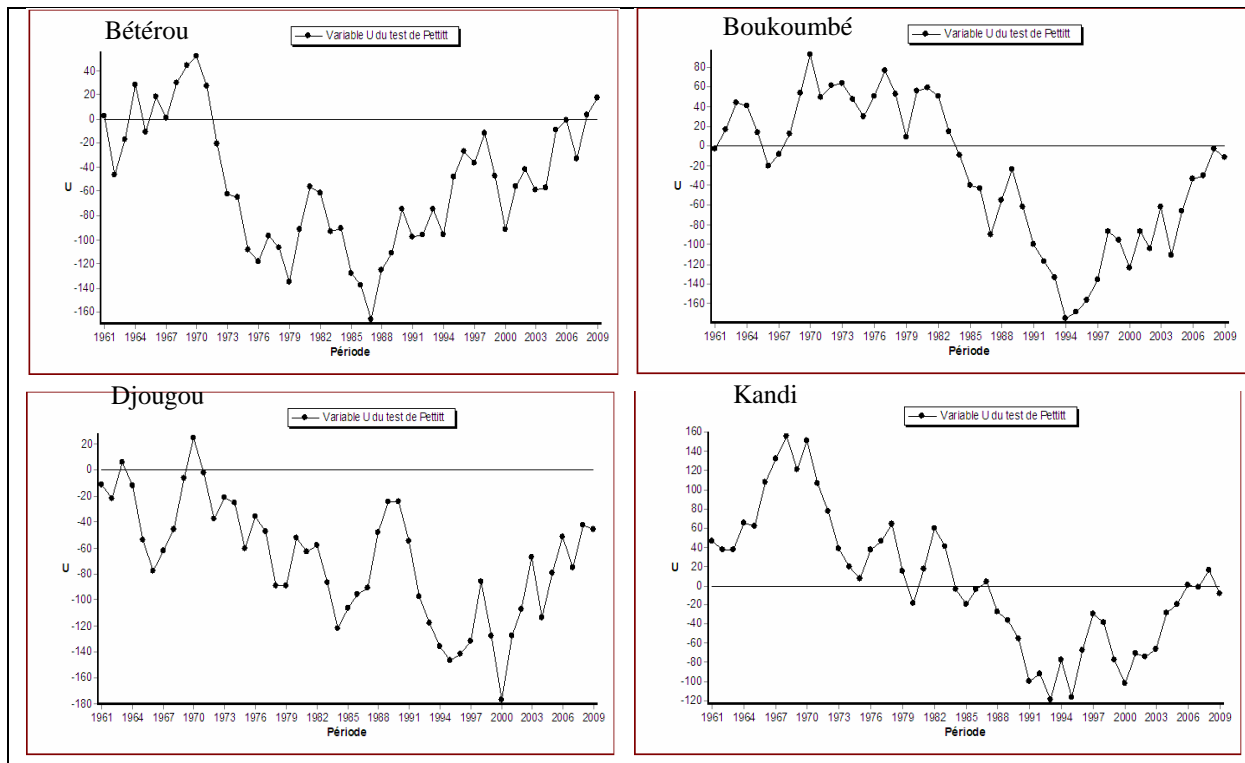
Par ailleurs, il est important de souligner également que la décennie 1970 réputée moins pluvieuse au Bénin n'a pas de valeur "record".

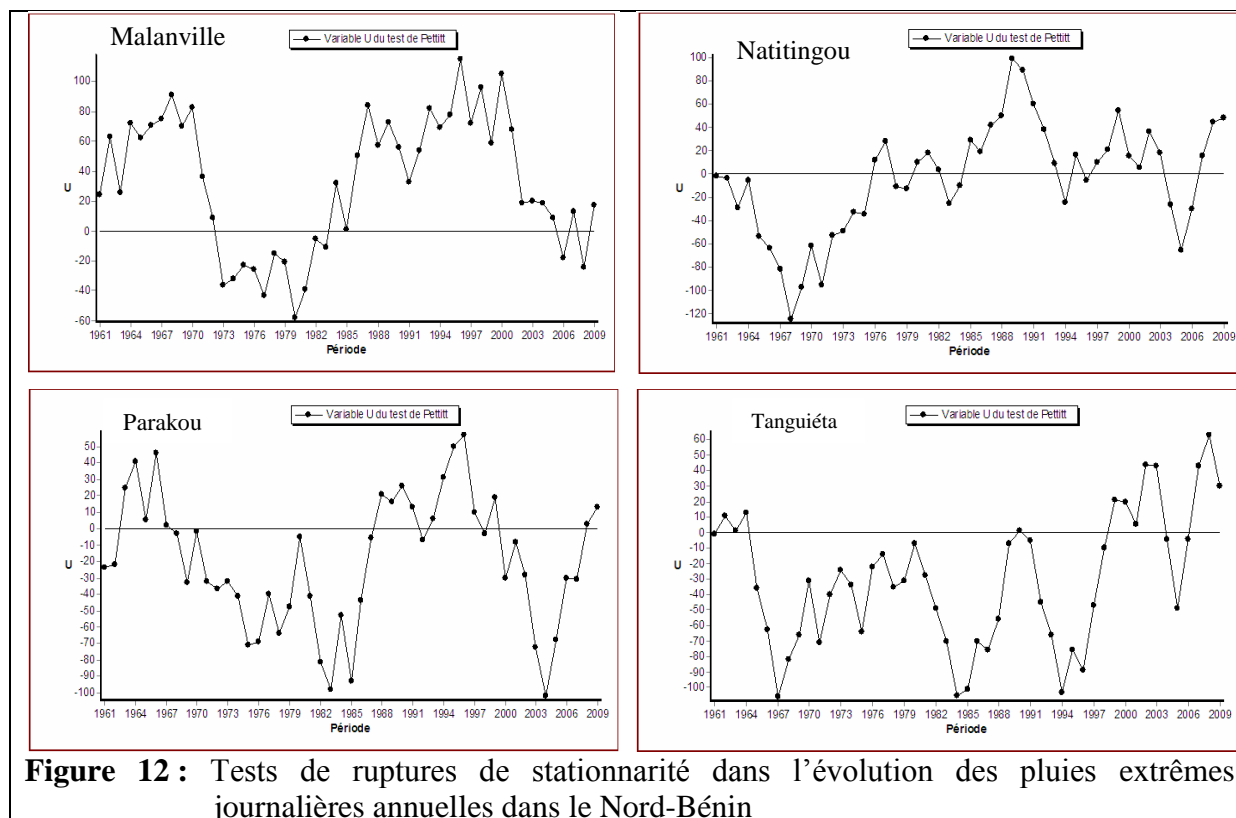
Quant à l'organisation spatiale de ces valeurs, on peut retenir qu'on est en présence d'un gradient pluviométrique global qui est sud-ouest-nord-est (127,6 mm à Malanville, 134,4 mm à Kandi, 128,3 mm à Tanguiéta, 134,6 à Bétérou, 147,7 à Natitingou, 139,3 à Parakou, 142,2 à Djougou et 159,9 à Boukoumbé).

Une telle répartition atteste que l'abondance des pluies journalières est plus influencée par le relief présent à l'ouest du secteur d'étude. Mieux, il faut souligner que le FIT joue aussi un rôle important dans la répartition spatiale des pluies extrêmes journalières dans le milieu d'étude.

#### 4.2. Extrêmes journaliers positifs

La figure 12 montre les résultats issus des tests de rupture de stationnarité dans l'évolution des pluies extrêmes journaliers positifs annuels dans le Nord-Bénin.





L'examen de la figure 12 permet d'obtenir les résultats du tableau VI. Ce dernier présente les résultats des tests de rupture et les seuils de significativité.

**Tableau VI:** Résultats des tests de rupture de stationnarité dans la série 1951-2010

Stations	Résultats du test de rupture	Seuil de significativité
Bétérou	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Boukoumbé	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Djougou	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Kandi	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Malanville	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Natitingou	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Parakou	Pas de rupture	Acceptée à 99 %
Tanguéta	Pas de rupture	Acceptée à 99 %

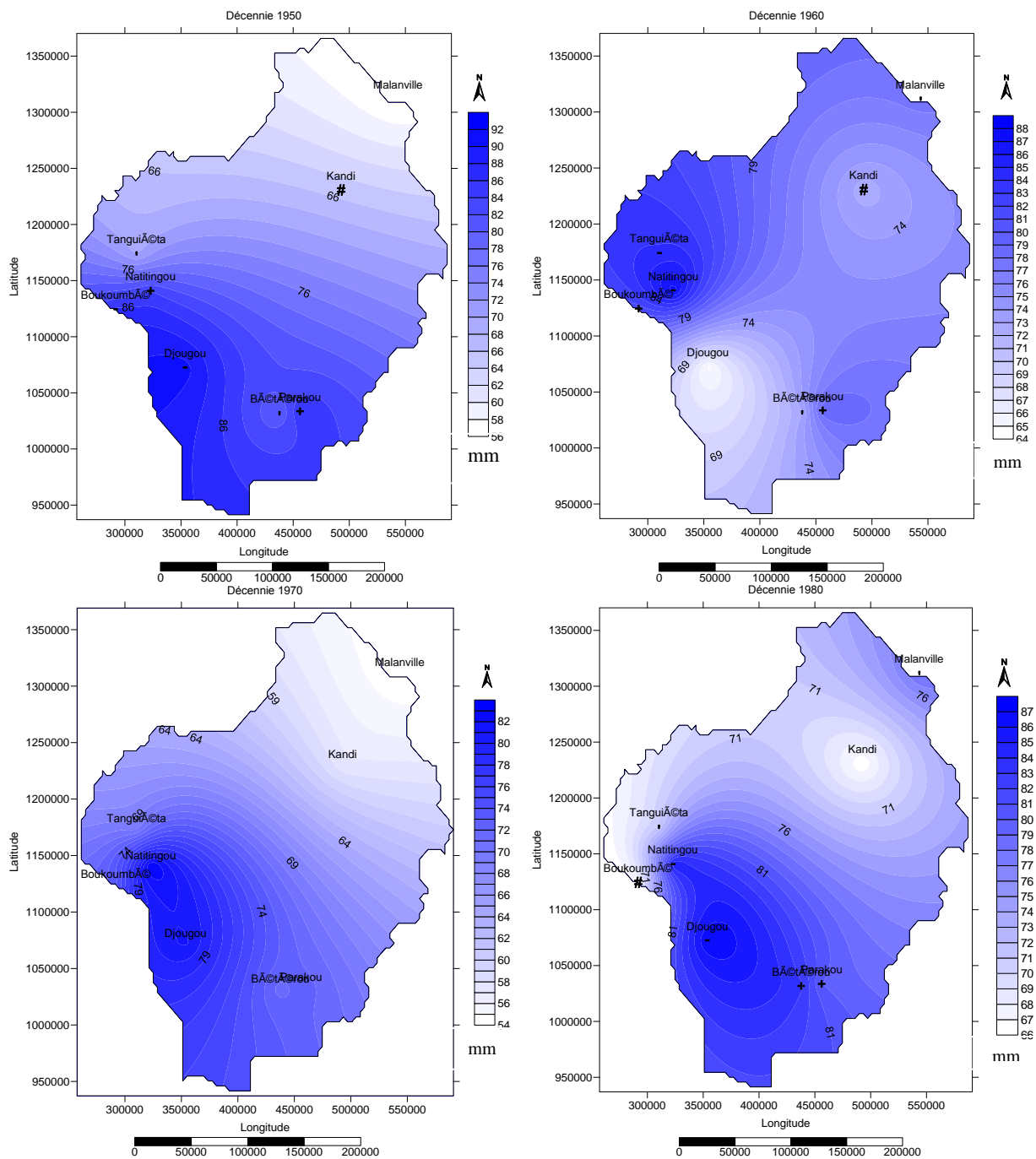
**Source :** Traitement des données, mars 2013

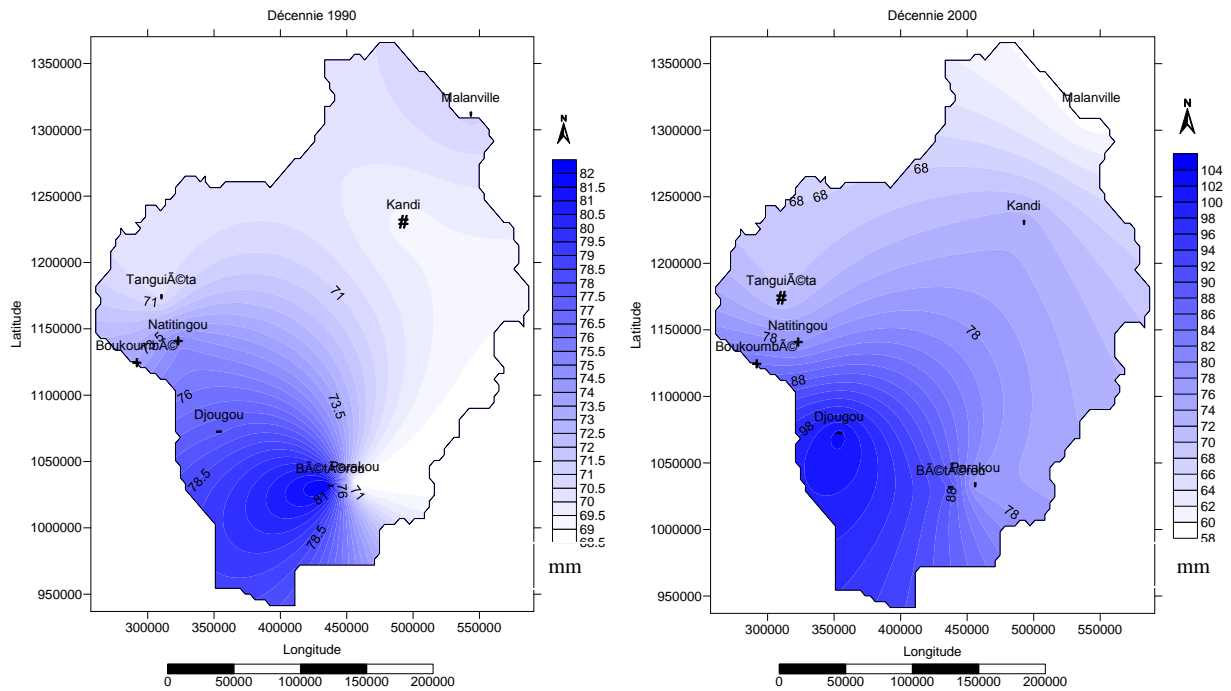
L'analyse des données du tableau VI permet de dire qu'aucune des stations n'a enregistré de rupture significative sous la période 1951-2010. Comme le souligne Brou *et al.* (1998), l'absence de rupture dans une série pluviométrique ne signifie pas qu'il n'y a pas de variation des précipitations dans le temps, mais que cette variation, si elle existe, reste peu significative. Tel est le cas enregistré au niveau de ces stations du Nord-Bénin sur la période d'analyse.

### 4.2.1. Répartition spatiale des fréquences

Les précipitations sont les principaux éléments qui déterminent fondamentalement les climats sous les latitudes intertropicales. C'est pourquoi ce paramètre est choisi dans le cadre de l'analyse spatiale des fréquences des extrêmes pluviométriques dans la région d'étude.

La figure 13 présente l'évolution par décennie de la trame climatique dans le Nord-Bénin sur la période 1951-2010.





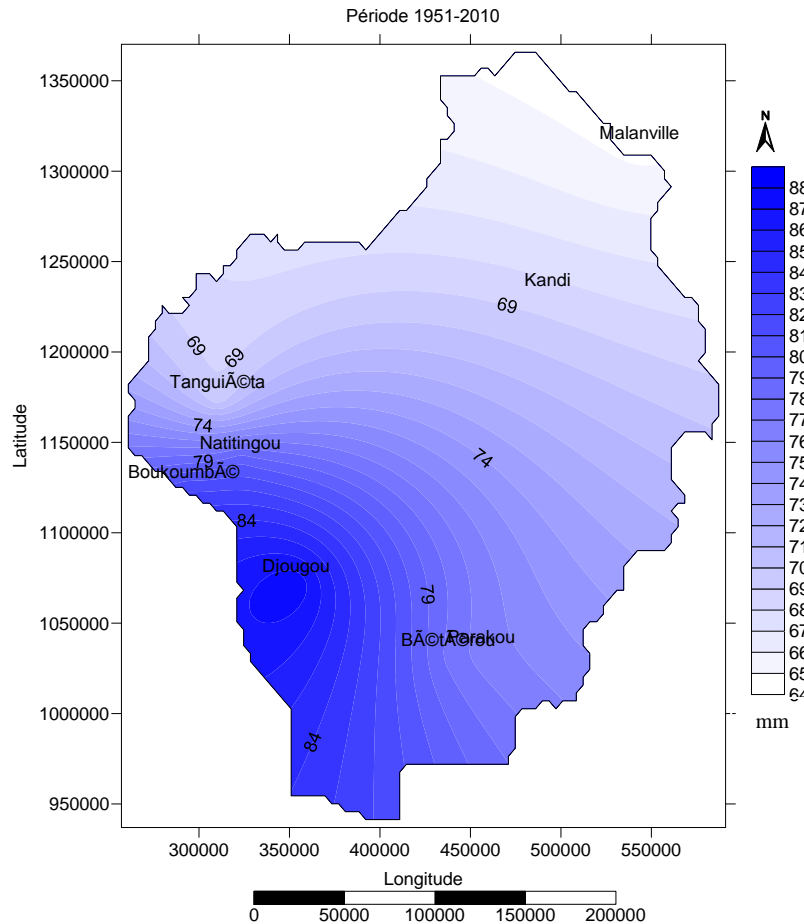
**Figure 13 :** Distribution spatiale décennale des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin sur la période 1951-2010

L'analyse de l'évolution des pluies extrêmes sur la période 1951-2010 à travers la figure 13 révèle que les départements de l'Atacora-Donga ont connu plus d'événements pluvieux extrêmes que les départements de l'Alibori-Borgou. En effet, il faut remarquer globalement que les plus fortes valeurs sont enregistrées au cours des décennies 1950, 1960, 1990 et 2000. En revanche, les décennies 1970 et 1980 sont caractérisées par des valeurs pluviométriques extrêmes les plus faibles.

En outre, il faut faire remarquer que pendant les décennies 1960 et 1980 des poches de sécheresses bien localisées ont été enregistrées respectivement à Djougou et à Kandi. Mise à part ces deux cas, tout le reste du secteur d'étude a été arrosé. Dans le même temps, pendant les décennies 1950 et 1970, les localités de Kandi et Malanville sont restées indigentes. Cet état de chose peut s'expliquer par l'effet du phénomène des pluies de ligne de grain qui s'accompagnent de vents violents et sont mal distribuées dans l'espace et dans le temps.

Par ailleurs, au cours des décennies 1990 et 2000, le sud-ouest du secteur d'étude a été plus pluvieux que le nord-est. Mieux, la tendance des pluies extrêmes journalières est semblable à celle des hauteurs de pluies annuelles. Le gradient pluviométrique est sud-ouest-nord-est sur l'ensemble des six (06) décennies. Ce constat peut s'expliquer par

l'influence qu'a le relief sur les manifestations pluvieuses dans le nord-ouest de la région d'étude. La figure 14 présente la synthèse de l'évolution des pluies extrêmes journalières dans le Nord-Bénin sur l'ensemble de la période d'analyse.



**Figure 14 :** Synthèse de la distribution spatio-temporelle des pluies extrêmes journalières dans le Nord-Bénin sur la période 1951-2010

Il ressort de l'analyse de la figure 14 relative à l'évolution des pluies extrêmes sur la période 1951-2010 que les départements de l'Alibori et du Borgou ont connu moins d'événements pluvieux extrêmes que les départements de l'Atacora et de la Donga.

Par ailleurs, le GIEC (2007) projette que la progression de la sécheresse conduirait à une intensification du stress hydrique. Ce phénomène paraît très certain dans le nord-est du Bénin au regard des variations observés depuis les années 1970 d'autant plus que le régime pluviométrique du Nord-Bénin prend le pas sur celui du centre Bénin dans cette région de transition climatique. De plus, le mode de répartition des pluies extrêmes évolue vers le retard des événements pluvieux et le raccourcissement de l'unique saison pluvieuse qui caractérise normalement le Nord-Bénin. Ceci détermine

l'allongement de la période sèche et la violence des pluies extrêmes observée dans le secteur d'étude (Houndénou, 1999).

#### **4.2.2. Tentatives d'explication de la distribution des extrêmes journaliers positifs**

La saison sèche au Nord-Bénin s'étend d'octobre-novembre à mars-avril. Durant cette période, l'ensemble du secteur d'étude est sous l'influence du flux de nord-est sec, l'harmattan. De novembre à mars, les précipitations ne dépassent guère en moyenne 25 mm. Parmi ces mois secs, janvier apparaît le moins arrosé sur toutes les stations.

Le mois d'avril se révèle un mois de transition sur l'ensemble de la région d'étude: les pluies ne sont pas encore persistantes, puisque nulle part les hauteurs relevées ne dépassent 73 mm.

Par ailleurs, Kandi, station synoptique de référence, n'a jamais connu durant ce mois, plus de huit jours de pluie pendant la période d'analyse sauf en 1978 (douze jours) C'est ce même constat qu'a fait Vissin *et al.*, en 2003.

D'un point de vue statistique, la variabilité climatique pose le problème de la stationnarité des séries pluviométriques, et de la validité des analyses basées sur les statistiques. S'il est avéré que cette variabilité se manifeste par une élévation de la température moyenne (environ 0.6°C pour le 20<sup>e</sup> siècle, et des prévisions entre 1.5 et 6°C d'ici 2100), son impact sur l'augmentation des pluies extrêmes reste difficile à caractériser. En effet, la maille des modèles atmosphériques utilisés pour les simulations est généralement très large, et dans ces conditions, on ne peut étudier que des événements extrêmes de grande extension spatiale, par exemple les cyclones tropicaux selon OMM (2000).

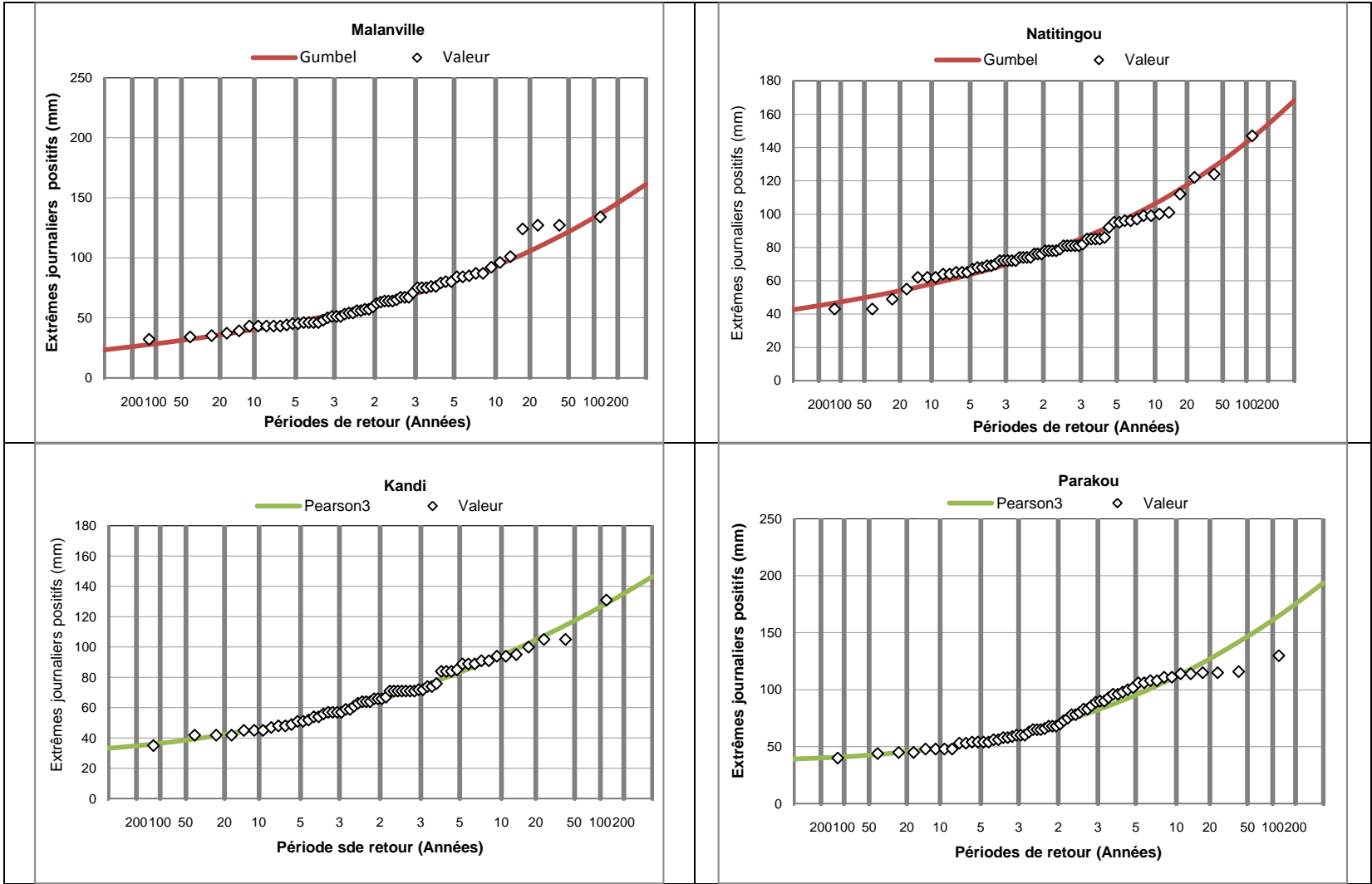
Par ailleurs, dans son rapport de 2001, le Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2001) souligne que les pluies extrêmes devraient très probablement augmenter en magnitude, et ce, dans toutes les zones climatiques.

Dans le Nord-Bénin, les distributions spatio-temporelles des pluies extrêmes varient considérablement d'un point à un autre. Mieux, l'orographie en est l'une des causes permettant d'expliquer l'instationnarité spatiale de ces distributions.

### **4.3. Périodes de retour des extrêmes journaliers positifs**

#### **4.3.1. Ajustement des lois corrélées et récurrence des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin**

La figure 15 montre l'ajustement des pluies journalières extrêmes à partir des lois testées. Ce test a permis de mieux analyser la fréquence d'apparition des pluies extrêmes journalières dans la région d'étude.



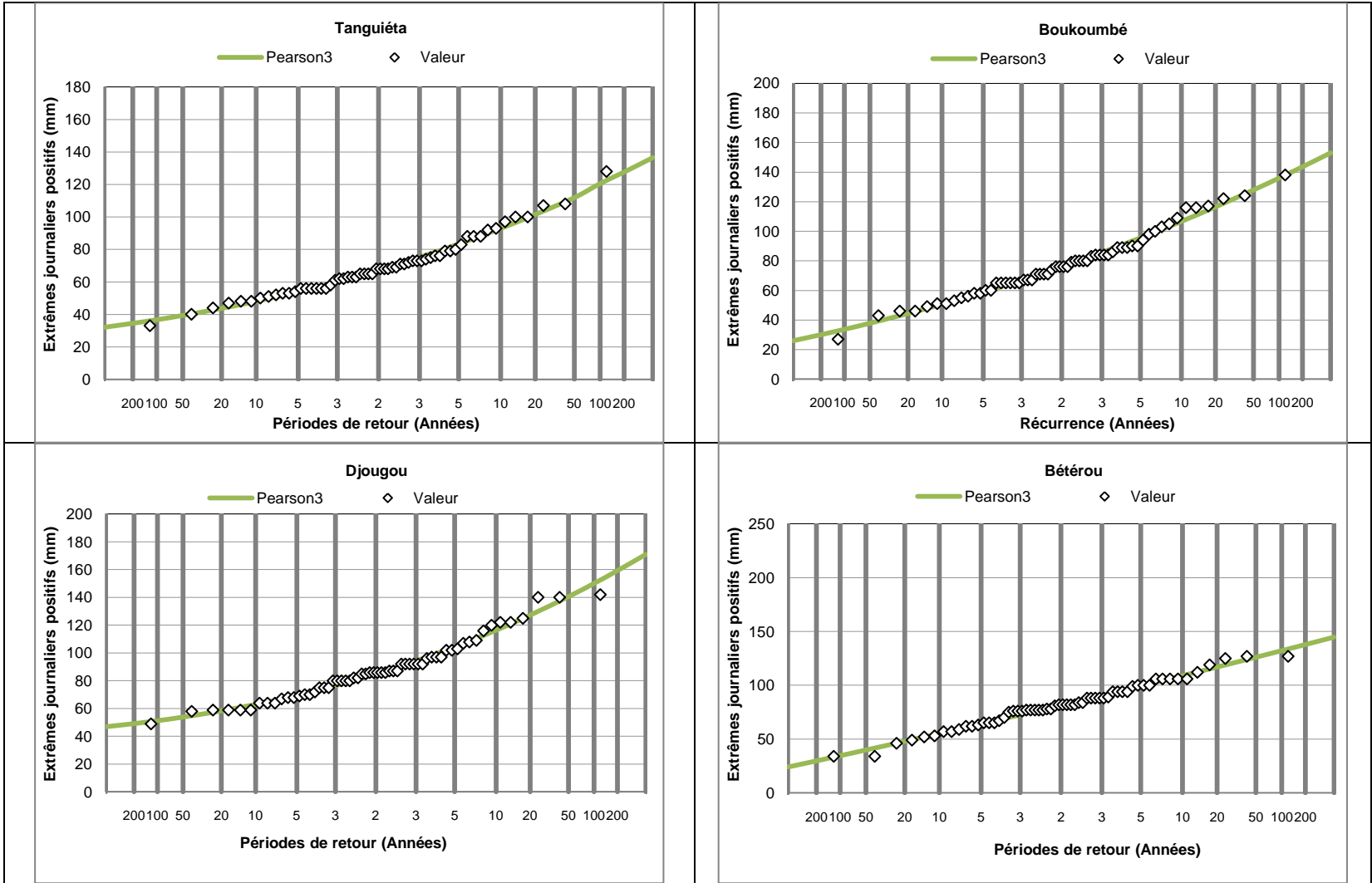
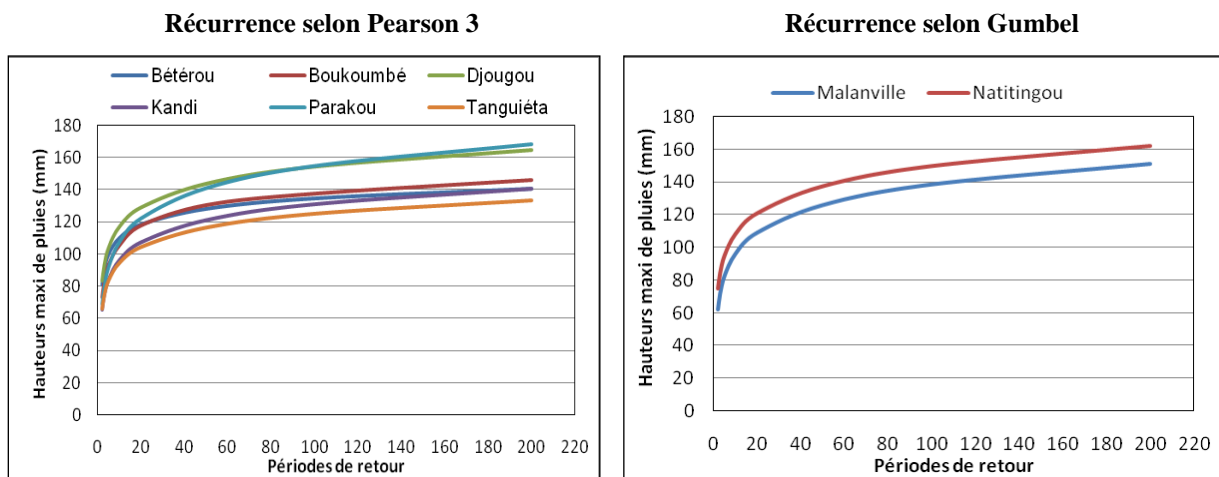


Figure 15 : Périodes de retour des extrêmes journaliers positifs dans le Nord-Bénin

L'analyse de la figure 15 permet de constater que les pluies journalières extrêmes sur chacune des stations ont tendance à mieux s'ajuster aux lois de Gumbel et de Pearson 3 avec un intervalle de confiance de 95 %. Ces ajustements ont permis de mieux analyser la récurrence des pluies extrêmes dans le secteur d'étude.

#### 4.3.2. Récurrence des extrêmes journaliers positifs dans le Nord-Bénin

La figure 16 montre les pluies journalières extrêmes en fonction des périodes de retour dans le secteur d'étude.



**Figure 16 :** Récurrences des extrêmes journaliers positifs en fonction des périodes de retour dans le Nord-Bénin

Il ressort de l'analyse de la figure 16 que les temps de retour des pluies extrêmes sur toutes les stations présentent quasiment la même allure. Par contre, les hauteurs de pluies extrêmes sur les stations de Parakou, Djougou et Natitingou sont plus importantes que celles obtenues au niveau des autres stations.

Par ailleurs, les éventuelles périodes de retour sont de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Les valeurs exceptionnelles sont les valeurs dont les périodes de retour sont supérieures à 10 ans et au-delà et paraissent plus élevées pour une période de 200 ans. Il faut donc retenir que ces résultats peuvent servir de socle dans la prise de décisions pour tout travaux d'aménagement, de dimensionnement des ouvrages de génie civil et pour la réalisation des systèmes d'alerte précoce inhérents aux risques d'inondations et autres catastrophes dans le secteur d'étude.

En outre, dans la plupart des stations du Nord-Bénin, les pluies extrêmes varient globalement entre 60 et 165 mm d'eau en 24 heures. Toutefois, la fréquence

d'occurrence des minima (60 mm) varie entre 2 et 10 % pour toutes les stations. Quant aux maxima (165 mm en 24 heures), leur fréquence d'occurrence varie entre 2,5 et 4,5 %. Or par définition, les événements extrêmes sont des événements dont la fréquence d'occurrence ne dépassent pas 2 % (Auliac, 1995). Les valeurs extrêmes du Nord-Bénin ayant une fréquence d'occurrence supérieure à 2, il s'en suit qu'il y a une augmentation significative de 2,6 % de cette fréquence. Mais, les plus fortes fréquences sont enregistrées par les événements ayant enregistré 80 mm de hauteurs de pluie dans la plupart des stations du secteur d'étude.

#### **4.4. Discussion**

Le climat du Nord-Bénin, tropical, chaud et humide, comporte de nombreuses nuances saisonnières et géographiques. Selon Boko *et al.* (2010), au cours de la période 1971-2000, le nombre de jours de pluie est en moyenne de 140 jours dans la partie méridionale. Il n'est que de 80 dans le Nord-Bénin.

Au cours de la période 1951-2010, le nombre de jours de pluies dans le Nord-Bénin est en baisse constante tandis que le nombre de pluies extrêmes augmente. A l'échelle annuelle, la baisse des précipitations est comprise entre 12 et 29 %, ce qui corrobore les résultats de Boko *et al.* en 2010. Selon ces auteurs, la diminution du nombre de jours de pluies est plus marquée au Nord qu'au Sud du Bénin.

Par ailleurs, l'analyse saisonnière des pluies extrêmes fait apparaître des différences significatives durant la période d'analyse. De façon globale, il est observé un raccourcissement de la saison des pluies ; ce qui provoque un déficit pluviométrique. Toutefois, le nombre de pluies extrêmes a connu globalement une augmentation. Plus spécifiquement, cela suggère donc une augmentation dans l'intensité, la fréquence et la durée des précipitations extrêmes (Fowler et Hennessy, 1995).

Des répercussions, surtout celles provenant des événements dits extrêmes, sont donc à prévoir sur de nombreux secteurs tant au niveau économique, social qu'environnemental. Des événements extrêmes peuvent survenir sous forme de sécheresses, de vagues de chaleur et de tempêtes de vent, mais aussi sous forme de pluies extrêmes. Il sera donc important pour les sociétés et gouvernements de

développer de nouvelles stratégies capables de s'adapter aux nouvelles réalités climatiques. Il s'avère alors indispensable d'avoir une bonne vision de la climatologie actuelle et des années futures afin de minimiser le plus possible les conséquences des pluies extrêmes en l'occurrence les inondations dans le Nord-Bénin.

D'autre part, d'après le rapport du GIEC de 2007, l'augmentation des pluies extrêmes est de 7,7 % (2046-2065) et de 12,3 % (2081-2100) par rapport à la période 1981-2000 qui n'a connu que 3,4 %. Ces projections climatiques suivent le scénario A<sub>1</sub>B du GIEC et sont confirmées par d'autres auteurs dont Emori et Brown en 2008. Conséquemment, une connaissance substantielle de l'évolution des pluies extrêmes est essentielle afin de minimiser le plus possible les impacts négatifs de ces événements sur l'environnement et la population.

#### **4.5. Limites de la présente recherche**

Au terme de la présente recherche consacrée à la caractérisation et la dynamique spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin, quelques insuffisances sont à noter.

Dans un premier temps, il faut souligner les insuffisances liées aux différents logiciels utilisés dans le cadre du traitement des données pluviométriques. Ces logiciels ont permis de caractériser et de spatialiser les pluies extrêmes journalières et annuelles. Or, la conception de ces derniers n'a pas forcément tenu compte des réalités climatiques du Bénin ; ce qui constitue une limite majeure.

Par ailleurs, viennent les limites liées aux biais inhérents aux enquêtes qualitatives non réalisées. Cette étape s'est voulue être purement statistique qui ne s'est fondée que sur les relevés pluviométriques. Pour y remédier, il est envisagé pour les futurs travaux de réorienter le sujet de recherche afin d'y inclure la vulnérabilité des établissements humains.

Dans la plupart des stations météorologiques existantes dans le secteur d'étude se posent un problème fondamental de discontinuités dans les séries observées qui sont parfois longues de plusieurs années.

Compte tenu de la durée généralement courte de la série d'observation (60 ans), le comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes reste difficile à caractériser si l'on ne considère que les observations locales et si l'on n'élargit pas à un espace régional homogène, ou rendu homogène par une transformation ad hoc (Dalrymple, 1951; Roche, 1963; Cunnane, 1988; Buishand, 1991; Neppel, 1997; Gellens, 2002).

## **Conclusion et perspectives pour les travaux futurs**

Les présents travaux de recherche apportent des connaissances relatives à la caractérisation et la dynamique des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin. Cette étude a pour but de montrer la dynamique appréhendée dans la distribution spatio-temporelle et la fréquence d'occurrence des pluies extrêmes dans cette région d'étude.

L'analyse fréquentielle appliquée aux données pluviométriques journalières sur la période 1951-2010, montre que les pluies extrêmes sont marquées par une fréquence moyenne sur l'ensemble de la période d'analyse. Toutefois, il ressort des analyses que la dynamique des pluies extrêmes montre que les départements de l'Alibori et du Borgou ont connu une diminution des événements pluviométriques extrêmes contre les départements de l'Atacora et de la Donga qui en ont connu une augmentation de 2,6 %.

La hauteur de pluie par événement pluvieux extrêmes est plus élevée aux stations du nord-ouest de la région d'étude que dans le nord-est. Les hauteurs de pluies saisonnières sont bien corrélées avec le nombre annuel d'événements pluvieux extrêmes.

Les périodes de retours des pluies extrêmes journalières ont montré que la fréquence d'occurrence des pluies extrêmes diminue progressivement du sud-ouest vers le nord-est.

Par ailleurs, il n'y a pas une tendance claire du nombre d'événements pluvieux dans le temps. Mais, les plus faibles valeurs sont observées au cours des décennies 1970 et 1980. Les nombres de jours pluvieux n'ont pas connu une augmentation notable au cours de la période d'analyse contrairement aux hauteurs de pluies annuelles dont les valeurs ont légèrement repris après les années extrêmement déficitaires, surtout les décennies 1970 et 1980. De même, il n'y a une tendance claire des pluies extrêmes journalières. Mais globalement, il faut remarquer que les plus fortes valeurs sont enregistrées au cours des décennies 1950, 1990 et 2000. En revanche, les décennies 1970 et 1980 sont caractérisées par des valeurs pluviométriques extrêmes les plus faibles. La tendance des pluies extrêmes journalières est semblable à celle des hauteurs de pluies annuelles.

En outre, les années qui ont enregistré des valeurs pluviométriques journalières “record” coïncident exactement avec les années extrêmement excédentaires à l’échelle annuelle. Ces valeurs sont enregistrées au cœur de la mousson, ce qui confirme l’influence prépondérante de ce facteur pluviogénique sur l’abondance des pluies extrêmes journalières au Nord-Bénin.

Les années extrêmement déficitaires sont caractérisées par une diminution du nombre de jours pluvieux durant toutes les séquences saisonnières (début, cœur et fin de la saison pluvieuse) et le mois de janvier est presque sans jour pluvieux.

Dans les travaux futurs, la démarche méthodologique à utiliser sera axée sur l’établissement de scénarios climatiques et une modélisation des relations pluies extrêmes-agriculture.

Plusieurs approches multicritères seront utilisées afin de faire une étude intégrant tous les facteurs physiques et humains qui déterminent la dynamique des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin. Cette étude sera conduite à travers le sujet intitulé : **Répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le Nord-Ouest du Bénin : trajectoire et vulnérabilités des établissements humains** dans le cadre de la rédaction d’un mémoire de thèse de Doctorat en géoscience et gestion de l’environnement.

## Bibliographie

- Adam K. S. et Boko M. (1993)** : Le Bénin. Ed. du flamboyant, Cotonou, 93 p.
- Afouda F. (1988)** : Extraits des cours de stage du Centre de Météorologie Spatiale ; Lannion, 56 p.
- Afouda F. (1990)** : L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional: Etude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural dans la savane africaine. Thèse de doctorat unique de l'Université Paris IV Sorbone, 428 p.
- Afouda F. (2006)** : Bilan de l'eau et applications agroclimatologiques dans le nord Bénin. Annale de la FLASH, université d'Abomey-Calavi, n°12 (2006), pp 85-101.
- Agli H. (1995)** : Recherches sur la variabilité pluviométrique dans le bassin-versant du Niger au Bénin. Mémoire du DEA "climats et contraintes climatiques", Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 48 p.
- Akouègnihò V. (1992)** : Analyse fréquentielle du démarrage de la saison pluvieuse dans le Bénin septentrional. Mémoire de maîtrise de géographie UAC/FLASH, 118 p.
- Amani M. K. et al. (2010)** : Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, article 513, mis en ligne le 07 décembre 2010, 33 p.
- André J. C. (2007)** : Les cyclones tropicaux et le changement climatique. Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), 10 p.
- Arlery R. Grisolle H. (1973)** : Climatologie : Méthodes et pratiques, Gautier Villars, Paris, 434 p.
- ASECNA (1990)** : Bref aperçu sur le temps et le climat au Bénin, 20 p.
- Benkhaled A. (2007)** : Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Chélif : comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*-N°08, pp.83-91.
- Brou Y. T. et al. (1998)** : Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien Abidjan, Côte d'Ivoire, pp. 1-7.
- Bigot S. et al. (1997)** : Structure spatiale de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1951. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t.324, série IIa, pp181-188.
- Boko et al. (2010)** : Les enjeux des changements climatiques au Bénin ; Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest, 71 p.
- Boko M. (1988)** : Climats et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de doctorat d'Etat ; 2 tomes ; Centre de Recherches de Climatologie. URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, 608 p.

**Boko M. et Adjani L. C. (1994) :** Recherche de tendance dans les séries pluviométriques du Bénin : implications agro climatologiques. Publication de l'AIC, Vol 7, pp 294-304.

**Bokonon Ganta E. (1987) :** Les climats de la région du golfe du Bénin. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Paris 248 p + annexes.

**Bokonon-Ganta E. B. (1992) :** Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne : Remise en cause de la stationnarité des séries. In l'aridité : une contrainte pour le développement. Editions ORSTOM ? pp 37-51.

**Carter T. R. (1995) :** Directives techniques du GIEC pour l'évaluation des incidences de l'évolution du climat et des stratégies d'adaptation. ; OMM ; Suisse, 62 p.

**Chabi A. B. P. (2010) :** Répartition spatio-temporelle des pluies journalières dans le Bénin central. Mémoire de maîtrise en géographie, UAC/FLASH, 70 p.

**Chourou A. (1988) :** Structure de la saison des pluies en Afrique Soudano-Sahélienne. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 263 p.

**Colin L. S. (2004) :** Changement climatique, phénomènes météorologiques extrêmes et effets sur la santé en Alberta. Université d'Alberta, 13 p.

**Direction de la météorologie de Cotonou, (1990) :** Bref aperçu sur le climat du Bénin 89 p.

**Donou T. B. (2007) :** Dynamique pluvio-hydrologique et manifestation des crues dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou. Mémoire de Maîtrise de géographie.UAC/FLASH. 104 p.

**Donou T. B. (2009) :** Evénements Pluvio-hydrologiques extrêmes et production agricole dans le delta du fleuve Ouémé. Mémoire de DEA/UAC/FLASH, 82 p.

**Doukpolo B. (2007) :** Vulnérabilité et tendances pluviométriques dans le Nord-Ouest centrafricain : Enjeux environnementaux. Mémoire de DEA, EDP/UAC, 73 p.

**Emmanonhoue A. (2008) :** Répartition spatiale des pluies dans le Mono-Couffo et conséquence sur la production agricole. Mémoire de maîtrise de géographie, UAC/FLASH, 94 p.

**Escourrou G. (1987) :** Climatologie pratique ; Masson, Paris, 172 p.

**Fontaine B. (1986) :** La variabilité des précipitations en domaine Sahélien et ses connexions avec la circulation atmosphérique africaine atlantique. In cahier de centre de recherche de climatologie, N°11, URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, pp 85-91.

**Fontaine B. (1990) :** Etude comparée des moussons indiennes et Ouest-africaine : caractéristiques, variabilités et télé-connexions. Thèse de doctorat d'Etat ès-Lettres et Sciences Humaines, centre de recherches de climatologie, URA 909 du CNRS, université de Bourgogne, Dijon, 2 volumes, 511 p.

**Gallée H. et al. (1994) :** Development of a three-dimensional meso- $\gamma$  primitive equation model: Katabatic wind simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, pp 671-685.

**GIEC (2001) :** Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'Evaluation de la vulnérabilité en Afrique. Island Press, Washington, 53 p.

**GIEC (2007) :** Résumé à l'intention des décideurs (traduction non-officielle). Contribution du groupe de travail 1 au 4ème rapport d'évaluation du GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques, 25 p.

**Houndakinnou G. R. (2005) :** Evénements pluviométriques extrêmes et vulnérabilité des établissements humains dans le sud-Bénin. Mémoire de maîtrise de géographie, UAC/FLASH, 129 p.

**Houndakinnou G. R. (2003) :** Fréquence des événements pluvieux extrêmes et leurs impacts environnementaux dans la ville de Cotonou. Mémoire de maîtrise de DEA, UAC, 60 p.

**Houndénou C. (1992) :** Variabilité pluviométrique et conséquences socio-écologiques dans les plateaux du bas-bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire de DEA « climats et contraintes climatiques », Dijon, 2 tomes, tome1, texte (90 p), tome 2, figures et tableaux.

**Houndénou C. (1999) :** Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de doctorat. UMR 5080 CNRS « Climatologie de l'espace tropical », Université de Bourgogne, centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 341 p.

**Houndénou C. Hernandez K. (1998) :** Modification de la saison pluvieuse dans l'Atacora (1961-1990) : un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique Occidentale). Science et changements planétaires, 14 p.

**Houndjahoué C. N. (1999) :** Contribution cartographique à l'étude des climats du Bénin, Mémoire de maîtrise UNB /FLASH ; 57 p.

**Hounsou A. (2004) :** Variabilité climatique et développement agricole dans la commune de Tchaourou. Mémoire de Maîtrise de géographie, UAC/FLASH, 92 p.

**Houssou C. S. (1998) :** Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-Ouest du Bénin et leurs implications socio-économiques. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 331 p.

**Hulme M. et al. (2001):** Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. Global Environmental Change, vol. 11, pp 19-29.

**Ouorou-Barrè I. (2010) :** Variabilité climatique et production agricole dans les communes de Tanguiéta et Matéri. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, 109 p.

**Idiéti N. E. (2012):** Les hydro-écorégions du bassin de la Pendjari au Bénin : Analyse des déterminants socio-économiques et environnementaux de la dynamique des écosystèmes naturels. Thèse de Doctorat Unique, UAC, 152 p.

**IPCC (2001):** Third Assesment Report Climate Change the Scientific basis, 2001; 121 p.

**IPCC (2002):** Workshop on changes in extreme weather a climate event. Beijing, China 11 - 13 June 2002.

- IPCC (2007)** : Quatrième rapport sur le changement climatique, 384 p.
- Janicot S. (1990)** : Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulation quasi-stationnaire durant une phase de transition climatique. 1<sup>ère</sup> partie - synthèse. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 178 p + annexes.
- Le Barbe et al. (1993)** : Les ressources en eau superficielle de la république du Bénin. Edition ORSTOM. 290 p.
- Leroux M. (1970)** : La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale. Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Dakar, 582 p.
- Mama Sani I. (1993)** : Les perturbations pluvio - orageuses en 1987 à partir des images Météosat II. Mémoire de Maîtrise UNB/FLASH 87 p.
- Massouangui Kifouala M. (2004)** : Etude de la pluviométrie journalière dans le sud du Congo de 1950 à 2002. Mémoire de DEA. UMN/FLSH, 70 p.
- Meylan et Musy, (1999)** : Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. Annale revue hydrologie. 19 P.
- Ogouwalé E. (2004)** : Changements climatiques et sécurité alimentaire dans le Bénin méridional. Mémoire de DEA, UAC/FLASH/EDP, 103 p.
- Ogouwalé E. (2006)** : Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : Indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse de Doctorat unique, EDP/FLASH, 302 p.
- Ogouwalé R. (2013)** : Changements climatiques, dynamique des états de surface et perspectives sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua. Thèse de Doctorat unique, EDP/FLASH, 200 p.
- OMM (1990)** : Guide des pratiques climatologiques OMM Genève
- OMM (Octobre 1997)** : Vol 46, bulletin N°4
- OMM (Octobre 1998)** : vol 47, bulletin n°4
- OMM (Octobre 1999)** : vol 48, bulletin n°4
- OMM (Octobre 2000)** : vol 49, bulletin n°4
- OMM (2002)** : Réduction de la vulnérabilité à l'égard des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ; Genève 36 p.
- Ouorou-Barrè I. (2007)** : Variabilité climatique et production vivrière dans la commune de Tanguiéta. Mémoire de Maîtrise de géographie, UAC/FLASH, 75 p.
- Olaniran O. J. (1991)**: Evidence of climatic change in Nigeria based on annual series of rainfall of different daily amounts, 1919-1985. Climatic change, vol. 19, pp 319-341.
- Pagney P. (1973)** : La climatologie. QSJ ? ; PUF ; Paris, 190 p.
- Perreault L. et Bobée B. (1992)** : Loi généralisée des valeurs extrêmes. Propriétés mathématiques et statistiques. Estimation des paramètres et des quantiles XT de période de retour T. INRS-Eau, rapport de recherche n° 350, Québec, 22 p.

**Philippon N. (2002) :** Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : Méthodes et diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001). Thèse de Doctorat, CRC, Université de Bourgogne, 242 p.

**Sultan B. et al. (2003):** Climatic variability in West Africa on the scales seasonal and intra-seasonal. I: Installation of monsoon and intra-seasonal variability of the convection. Sécheresse, 15, pp 321-330.

**Sultan B. et al. (2004) :** La méningite à méningocoque au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest. Environnement, risques et Santé, vol. 3, n°1, pp 21-32.

**Totin V. S. H. (2005) :** Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du sud-Bénin. Mémoire de DEA. UAC. 84 p.

**Van Vyve N. (2006) :** Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la pluie au Fagara, Niger, Travail de fin d'études présenté en vue d'obtention du grade de bio-ingénieur, 75 p.

**Vissin E. W. (2001) :** Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin du fleuve Niger. Mémoire de DEA, Université de Bourgogne. Dijon, France, 52 p.

**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, Université de Bourgogne. Dijon, France, 285 p.

**Yabi I. (2002) :** Particularité de la variabilité pluviométrique entre le 7° et 8° de latitude nord au Bénin 95 p + annexes.

**Yabi I., Afouda F. et Boko M. (2004) :** Quelques particularités de la variabilité pluviométrique dans un climat de transition : Cas du département du Zou au Bénin (Afrique de l'Ouest). Actes du XVIIème colloque de l'association Internationale de climatologie, université de Caen Basse-Normandie en France, pp 237-240.

**Yabi I. et Afouda F. (2007) :** Variabilité des hauteurs et du nombre de jours de pluie dans la région de transition climatique béninoise. Climat et développement, Université d'Abomey-Calavi, n°001 PP 13-22.

#### **Sites internet consultés**

CEDEAO - [www.ecowas.int](http://www.ecowas.int); 14/05/2012

CILSS - [www.cilss.bf](http://www.cilss.bf) ; 14/05/2012

FICR - [www.ifrc.org/fr](http://www.ifrc.org/fr); 04/07/2013

FIDA - [www.ifad.org](http://www.ifad.org); 19/0/2013

<http://www.africanfuturs.net>; 22/11/2013

<http://www.ipcc.ch/pub/un/giecgt2.pdf>; 12/01/2014

<http://www.ipcc.ch/pub/un/giecgt3.pdf> 25/02/2014

## Liste des figures

Figure 1 : Situations géographique et administrative du Nord-Bénin .....	9
Figure 2 : Réseau des stations retenues .....	14
Figure 3 : Principales étapes de l'analyse fréquentielle.....	17
Figure 4 : Circulation générale et mousson ouest africaine.....	23
Figure 5 : Régime pluviométrique moyen mensuel sur la période 1951-2010 dans les stations synoptiques (Parakou, Natitingou et Kandi) du Nord-Bénin .....	28
Figure 6 : Réseau hydrographique du Nord-Bénin.....	30
Figure 7 : Années extrêmement excédentaires par station .....	31
Figure 8 : Années extrêmement déficitaires par station .....	31
Figure 9 : Evolution du nombre de jours de pluies en fonction des années extrêmement excédentaires sur la période 1951-2010.....	34
Figure 10 : Evolution du nombre de jours de pluies en fonction des années extrêmement déficitaires sur la période 1951-2010.....	35
Figure 11: Faciès géomorphologiques du Nord-Bénin.....	37
Figure 12 : Tests de ruptures de stationnarité dans l'évolution des pluies extrêmes journalières annuelles dans le Nord-Bénin .....	45
Figure 13 : Distribution spatiale décennale des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin sur la période 1951-2010 .....	47
Figure 14 : Synthèse de la distribution spatio-temporelle des pluies extrêmes journalières dans le Nord-Bénin sur la période 1951-2010 .....	48
Figure 15 : Périodes de retour des extrêmes journaliers positifs dans le Nord-Bénin....	52
Figure 16 : Récurrences des extrêmes journaliers positifs en fonction des périodes de retour dans le Nord-Bénin.....	53

## Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques des stations et postes dont les données ont été utilisées ....	14
Tableau II : Répartition des années extrêmement excédentaires par station .....	32
Tableau III: Fréquences des extrêmes saisonniers en temps de pluies .....	39
Tableau IV: Fréquences des extrêmes saisonniers en temps de sécheresse .....	41
Tableau V : Valeurs record des pluies journalières dans le Nord-Bénin et leurs dates d'avènement.....	43
Tableau VI: Résultats des tests de rupture de stationnarité dans la série 1951-2010.....	45

## **Table des matières**

Sommaire .....	2
Liste des sigles et acronymes .....	4
Avant propos .....	5
Résumé.....	7
Abstract .....	7
Introduction .....	8

### **CHAPITRE I**

#### **ETAT DES CONNAISSANCES, PROBLEMATIQUE, CLARIFICATION DES CONCEPTS ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE .....10**

1.1. Etat des connaissances et justification du sujet .....	10
1.2. Clarification des concepts .....	12
1.3. Hypothèses de travail .....	13
1.4. Objectifs de recherche.....	13
1.5. Démarche méthodologique .....	13
1.5.1. Données utilisées .....	13
1.5.2. Recherche documentaire .....	15
1.5.3. Traitement des données.....	15
1.5.3.1. Détermination des pluies extrêmes .....	16
1.5.3.1.1. Détermination des valeurs extrêmes d'après la théorie de "la distribution des valeurs extrêmes" .....	16
1.5.3.1.2. Analyse de la tendance des pluies extrêmes .....	19

### **CHAPITRE II**

#### **FACTEURS GENERATEURS DES PLUIES EXTREMES DANS LE NORD-BENIN .....22**

2.1. Contexte climatique du Nord-Bénin .....	22
2.2. Circulation atmosphérique et facteurs pluviogéniques du Nord-Bénin.....	24
2.2.1. Régime pluviométrique.....	28
2.2.2. Réseau hydrographique du Nord-Bénin .....	29

## CHAPITRE III

### CARACTERISTIQUES DES PLUIES EXTREMES AUX ECHELLES

<b>ANNUELLES ET SAISONNIERES .....</b>	<b>31</b>
3.1. Pluies extrêmes annuelles .....	31
3.1.1. Années extrêmement déficitaires et excédentaires .....	31
3.1.2. Nombre de jours de pluie et relation avec les années extrêmement excédentaires	33
3.1.3. Tentative d'explication de la répartition des pluies extrêmes annuelles .....	36
3.2. Pluies extrêmes saisonnières .....	38
3.2.1. Extrêmes saisonniers déficitaires et excédentaires .....	38
3.2.2. Tentatives d'explication de la fréquence des extrêmes saisonniers.....	42

## CHAPITRE IV

<b>EXTREMES PLUVIOMETRIQUES A L'ECHELLE JOURNALIERE.....</b>	<b>43</b>
4.1. Valeurs record des pluies journalières .....	43
4.2. Extrêmes journaliers positifs.....	44
4.2.1. Répartition spatiale des fréquences.....	46
4.2.2. Tentatives d'explication de la distribution des extrêmes journaliers positifs.....	49
4.3. Périodes de retour des extrêmes journaliers positifs.....	50
4.3.1. Ajustement des lois corrélées et récurrence des pluies extrêmes dans le Nord-Bénin .....	50
4.3.2. Récurrence des extrêmes journaliers positifs dans le Nord-Bénin .....	53
4.4. Discussion .....	54
4.5. Limites de la présente recherche.....	55
Conclusion et perspectives pour les travaux futurs .....	57
Bibliographie.....	59
Liste des figures .....	64
Liste des tableaux.....	64
Table des matières.....	65