



HAL
open science

RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET VULNERABILITES DES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

Herve Koumassi

► **To cite this version:**

Herve Koumassi. RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET VULNERABILITES DES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI. Environnement et Société. Université d'Abomey Calavi, 2014. Français. NNT: . tel-01572602

HAL Id: tel-01572602

<https://hal.science/tel-01572602>

Submitted on 7 Aug 2017

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

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



Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espaces, Cultures et Développement »

Laboratoire Pierre PAGNEY Climat, Eau, Ecosystème et Développement
(LACEEDE)

Thèse de Doctorat Unique

Présentée par Dègla Hervé KOUMASSI

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey – Calavi (Benin)

Filière : Géographie et Gestion de l'Environnement

OPTION : Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace

N° d'enregistrement/ 229 - 2014 /EDP/GEN

RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET VULNERABILITES DES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

Sous la direction de :

Prof. Christophe S. HOUSSOU, Professeur Titulaire, Faculté des Lettres, Arts et
Sciences Humaines (FLASH)- Université d'Abomey Calavi (UAC)

Soutenue publiquement le 12 novembre 2014 , devant le Jury international composé de :

Président	: Brice SINSIN	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi
Rapporteur	: Christophe S. HOUSSOU	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi
1 ^{er} Examineur	: Marie-Joseph SAMBA KIMBATA	Professeur Titulaire Université de Brazzaville
2 ^e Examineur	: Euloge K. AGBOSSOU	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi
3 ^e Examineur	: Fulgence AFOUDA	Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi
4 ^e Examineur	: Expédit W. VISSIN	Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi

Mention : Très honorable avec Félicitations du Jury

Dédicace

A

Ma mère et mon père

Mon épouse, à Kharidad et Sarah-Maëlys

Sommaire

Dédicace.....	1
Liste des sigles et abréviations.....	5
Avant-Propos.....	7
Résumé.....	9
Summary.....	10
Introduction.....	11

PREMIERE PARTIE

CADRE THEORIQUE, CONCEPTUEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES

CHAPITRE I :

CADRE THEORIQUE CONCEPTUEL , FONDEMENTS PHYSIQUES ET HUMAINS DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES

1-1.Cadre théorique.....	16
1-2. Fondements physiques et humains de l'étude.....	20
1-3. Fondements humains de la vulnérabilité du bassin versant de la Sota.....	36
1- 4 Point des connaissances.....	40
1-5. Clarification des concepts.....	49
1-6. Cadre conceptuel de la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques.....	58

CHAPITRE II

APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA

2-1. Nature et source des données utilisées.....	61
2-2. Techniques de collecte des données.....	67
2-3 Méthodes de traitement des données.....	70

DEUXIEME PARTIE

CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE ET INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

CHAPITRE III:

CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

3-1. Variabilité climatique dans le bassin versant de la Sota	96
3-2. Bilan climatique	100
3-3. Variabilité hydrologique dans les sous bassins versants de la Sota.....	108
3-4. Bilan hydrologique du bassin versant versant de la Sota	112
3.6- Evolution des débits maximaux dans les sous bassin versant de la Sota	114

CHAPITRE IV:

ANALYSE DE L'INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

4-1. Analyse des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	117
4-2. Facteurs de vulnérabilité du bassin versant aux risques hydroclimatiques	127
4-3. Vulnérabilité du bassin versant de la Sota.....	130
4-4. Vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota.....	148

TROISIEME PARTIE

PERCEPTION DES MANIFESTATIONS DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET STRATEGIES D'ADAPTATION DANS BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

CHAPITRE V:

PERCEPTIONS PAYSANNES DES MANIFESTATIONS DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES

5-1. Indicateurs de l'avènement des risques hydroclimatiques.....	167
5-2. Perceptions paysannes des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	169

CHAPITRE VI:
STRATEGIES D'ADAPTATION AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE
BASSIN VERSANT DE LA SOTA

6-1. Stratégies institutionnelle, juridique et organisationnelle de gestion des risques dans la Sota.....	178
6-2. Stratégies endogènes	184
6-3. Stratégies exogènes.....	188
6.4. Suggestions.....	196
Conclusion.....	207
Bibliographie.....	211

Liste des sigles et abréviations

ABE :	Agence Béninoise pour l'Environnement
ASECNA :	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
AVHRR:	Advanced Very High Resolution Radiometer
AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
CCNUCC	(UNFCCC) : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CEDEAO :	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CARDER	: Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural
DSRP :	Document Stratégique de Réduction de la Pauvreté
ENDA TM :	Environnement et Développement du Tiers Monde
FAO :	Food and Agriculture Organization
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ICCARE :	Identification et Conséquences d'une Variation Climatique en Afrique de l'ouest non sahélienne
INSAE :	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
LACEEDE:	Laboratoire Pierre Pagny, Climat, Eau, Ecosystème et Développement
MEA:	Millennium Ecosystem Assessment
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA :	US National Oceanographic and Atmospheric Administration
OMM:	Organisation Mondiale Météorologique
OSS :	Observatoire du Sahara et du Sahel
PADEAR :	Projet d'Appui au Développement de l'Eau potable et de l'Assainissement en milieu Rural
PADPPA :	Programme d'Appui au Développement Participatif de la Pêche Artisanale
PAHA :	Projet d'Aménagement Hydro-Agricole

PANA :	Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques
PARBCC :	Projet de renforcement des capacités des Acteurs Ruraux Béninois face aux Changements Climatiques
PDSI:	Palmer Drought Severity Index
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PUASA :	Programme d'Appui à la Sécurité Alimentaire
SPI :	Standardized Precipitation Index
SPOT :	Satellite pour l'Observation de la Terre
UNITAR :	(anglais) Institut des Nations Unies pour la Recherche et la Formation

Avant-Propos

Depuis quelques décennies, la variabilité hydroclimatique en Afrique de l'Ouest se traduit par des événements climatiques extrêmes (exemple sécheresse, inondation). Ces phénomènes extrêmes sont de plus en plus fréquents depuis la fin des années 1960 (Houghton *et al.*, 2001; Gachon *et al.*, 2007), et plusieurs d'entre eux ont causé d'importants dégâts au cours des dernières années (Ozer *et al.*, 2003; Sene et Ozer, 2002). Le dernier rapport (GIEC, 2007) mentionne que ces phénomènes ont évolué de façon significative aux échelles globale, régionale et locale. En effet, les sociétés d'Afrique de l'ouest sont considérées comme les plus vulnérables de la planète face aux variations hydroclimatiques (Hansen, 2002 ; Barbier *et al.*, 2009). Et selon un rapport de la FAO (2006), entre 50 et 80 % de la population active des pays d'Afrique de l'ouest dépendent du secteur agricole qui procurent plus de 90 % des moyens d'existence (revenus, alimentation...) à la population totale.

Les efforts des recherches scientifiques consentis au cours des dernières décennies se sont principalement focalisés sur l'analyse et la compréhension de la variabilité hydroclimatique, leurs effets sur les activités humaines et la qualité de l'environnement bien qu'il existe encore de grandes incertitudes au sujet de ces changements.

La présente recherche, **"Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri"** développée pour l'obtention du diplôme de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, se veut être une contribution à la recherche des solutions pour la réduction des effets liés aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota.

Plus qu'un simple souci de sacrifier à la tradition, j'ai l'agréable devoir d'exprimer ici ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

J'adresse en premier lieu mes remerciements les plus sincères aux membres de mon jury de thèse qui ont accepté évaluer le travail présenté. Mes remerciements vont ainsi à mes pré-rapporteurs Monsieur SAMBA KIMBATA Marie-Joseph, professeur titulaire à l'Université Marion N'GOUABI, Congo Brazzaville ; monsieur AGBOSSOU Euloge, professeur titulaire à l'Université d'Abomey Calavi ; monsieur Fulgence AFOUDA, maître de conférence à l'Université d'Abomey Calavi ; pour leurs relectures attentives et critiques de mon manuscrit et leurs questions

pointilleuses mais fort utiles pour l'amélioration de la qualité scientifique du document.

Mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Professeur HOUSSOU S. Christophe, pour avoir dirigé ce travail bien qu'il soit difficile d'exprimer en quelques mots ma reconnaissance envers lui.

Ce travail n'aurait également pas pu être mené sans l'implication de Dr VISSIN Expédit W, dont les orientations, exhortations et critiques m'ont aidé à bien avancer de la thèse. Il m'a donné une rigueur dans la définition de la problématique, de la méthodologie et dans la rédaction finale de la thèse. Je vous exprime mes sincères remerciements et vous reste redevable.

Je remercie Dr Edouard KOUTINHOUI pour ses soutiens et ses nombreuses relectures.

Je tiens à remercier très respectueusement les professeurs Fulgence AFOUDA, Constant HOUNDENOU, Euloge OGOUWALE, Odile GUEDEGBE, Brice TENTE pour leurs encouragements et leurs soutiens.

Merci à tous les membres du LACEEDE YABI Ibouaïma, Ernest AMOUSSOU, Henri TOTIN, Léocadie ODOULAMI, Yacin BOKO, Romaric OGOUWALE et à tous les enseignants du Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT).

C'est aussi l'occasion d'exprimer ma profonde gratitude à monsieur Eugène HOUNTONDJI de l'ANPC, monsieur Arouna responsable des producteurs dans la commune de Malanville, Amidou, Abou et Déo-Gratias qui n'ont ménagé aucun effort pour m'accompagner dans les travaux de terrain

Je tiens à remercier les amis François GBESSO, Arsène AKOGNONGBE, Patrice BOKO, Gervais ATCHADE, Akibou AKINDELE, Djafarou ABDOULAYE, Barnabé HOUNKANRIN , Imorou OUOROU-BARRE, Aristide KOUTON, Cyrille TCHAKPA, Florence GBESSO, Edwige MIALO, Rachad ALI, Mathieu LANONKOU, Jules ODJOUBERE, Martin ASSABA, Japhet KODJA, Fidèle MEDEOU et à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Infiniment merci à tous !!!

Résumé

L'Afrique de l'ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables aux variabilités climatiques. L'insuffisance des pluies et leur mauvaise répartition dans le temps est marquée par la récurrence des phénomènes climatiques extrêmes. Les conséquences de ces événements et l'ampleur de leurs impacts sur les populations, suscitent la volonté de réaliser des études pour mieux comprendre comment ces risques hydroclimatiques impactent les écosystèmes.

Ainsi, l'objectif de cette recherche est d'étudier la vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota au Bénin.

L'approche méthodologique adoptée comprend deux phases. La première consiste à collecter les données météorologiques et hydrologiques afin d'étudier la dynamique hydroclimatique dans le bassin versant par l'utilisation combinée des tests statistiques. La caractérisation de la vulnérabilité des populations a été faite par l'analyse fréquentielle des événements hydroclimatiques extrêmes et par les indices de sécheresse.

La seconde est axée sur le regroupement des facteurs identifiés comme essentiels pour définir la vulnérabilité, leur croisement à l'aide de techniques d'analyse statistique multivariées pour la définition des critères. La cartographie des zones vulnérables à l'inondation a été faite, en utilisant un système d'information géographique et en combinant l'ensemble des informations par la méthode de cartographie à index.

Les résultats montrent que la variabilité climatique est marquée dans le bassin versant par une baisse des cumuls pluviométriques de l'ordre de 20 % sur la période 1960 à 2010. L'insuffisance des pluies et leur mauvaise répartition dans le temps ont entraîné l'occurrence des risques hydroclimatiques dont les majeurs sont la sécheresse et l'inondation. Les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation sont situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur du cours d'eau du bassin versant. De même, les zones à fort risque d'inondation se localisent principalement dans le nord et à l'ouest du bassin versant. Ces zones présentent un danger évident lors des crues et des inondations. Les ressources les plus exposées aux risques sont les cultures vivrières, les ressources en eau, la biodiversité et l'habitat. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et les exploitants agricoles émergents, les pêcheurs. Ainsi, ce sont les groupes sociaux les plus vulnérables du point de vue socio-économique qui sont à la fois plus exposés aux risques hydroclimatiques.

En somme, malgré les difficultés dues au manque de couverture spatiale et à l'hétérogénéité des données utilisées, cette recherche a permis de mettre en évidence la variabilité hydroclimatique, les risques majeurs qu'elles engendrent et la faible capacité d'adaptation des populations. Par conséquent, la diversification des sources de revenu peut contribuer à limiter les risques liés aux extrêmes hydroclimatiques par rapport à l'agriculture pluviale.

Mots clés: Risques, hydroclimatiques, vulnérabilité, écosystèmes, bassin versant, Sota

Summary

West Africa is one of the areas of the world most vulnerable to climate variability. Poor rains and poor distribution in time is marked by the recurrence of extreme weather events. The consequences of these events and the magnitude of their impact on our society, raise the desire to develop studies to better understand how these hydro climatic risks impact the ecosystems. Thus, the objective of this research is to study the vulnerability of the ecosystems to hydro climatic risks in the Sota basin in Benin.

The methodological approach adopted in two phases. The first is to collect the meteorological and hydrological data to study the hydro climatic dynamics in the basin by the combined use of statistical protocols. The characterisation of the vulnerability was made by frequency analysis of extreme hydro climatic events and indices.

The second phase focuses on the combination of the factors identified as essential to define vulnerability, their crossing using multivariate statistical analysis techniques for the definition of criteria. Vulnerable zones to flooding and flood risk mapping has been made, using a geographic information system and combining all the information.

The results show that climate variability in the basin is marked by a decrease of rainfall in the order of 20%. Poor rains and poor distribution in time have led the occurrence of major hydro climatic risks that are drought and flood. Nearly 50 % of the stations in the basin are affected by extreme drought between 1960 and 2008. The mapping analysis identified areas of very high vulnerability to flooding located near the riverbed and lowest points in the floodplain of the basin river. Similarly, areas with high risk of flooding are located mainly in the north and west of the basin. These areas have an obvious danger during floods and floods. The greatest risk resources are subsistence agriculture and water resources, biodiversity, habitat etc. The most vulnerable social groups are small farmers, gardeners and emerging farmers, fishermen.

So, the most vulnerable groups when taking into account the socio-economic point are the most exposed to climate risks. To sum up, despite the difficulties due to lack of spatial coverage and temporal heterogeneity of the data used, this research has highlighted the hydro climatic variability, the major risks they involve and low adaptation capacity of populations. Therefore, diversification of income sources limit the risks associated to hydro climatic variability compared to rain agriculture.

Keywords: Risk, hydro climatic, vulnerability, ecosystem, basin, Sota.

Introduction

Les recherches scientifiques concernant les effets de l'occurrence des extrêmes hydrométéorologiques sur les activités humaines et la qualité de l'environnement se sont intensifiées au cours des deux dernières décennies (Mara, 2010). En raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel et sur l'homme, les questions des extrêmes climatiques sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde (Kouassi *et al.*, 2010). Les sociétés modernes sont aujourd'hui de plus en plus confrontées aux conséquences des extrêmes climatiques : augmentation des températures, multiplication des phénomènes extrêmes, fonte des glaciers et montée du niveau des océans pour n'en citer que celles-là (GIEC, 2007). Ces conséquences peuvent avoir à moyen ou à long terme des conséquences sur les populations des régions touchées. Bien souvent les réseaux et les systèmes dits « essentiels » des sociétés sont directement touchés et deviennent sujets à des défaillances (Olivry, 2012).

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables aux variabilités climatiques et aux extrêmes. L'impact souvent désastreux des extrêmes climatiques au cours des trente dernières années est une bonne illustration et un des signes avant-coureurs de cette vulnérabilité. En effet, l'espace climatique tropical connaît depuis quelques décennies une augmentation de l'occurrence des phénomènes extrêmes. Ceux-ci ont attiré l'attention de la communauté universitaire (Paturel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1999) ; ils se manifestent par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires. Les conséquences peuvent être durables sur le cycle hydrologique surtout lorsqu'ils se traduisent par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau (Afouda *et al.*, 2007 ; Goula *et al.*, 2006). Le GIEC mentionne qu'entre le 3^{ème} et le 4^{ème} rapport (2001-2007), la vulnérabilité aux événements climatiques extrêmes s'est accrue en Afrique de l'Ouest. Cette vulnérabilité est liée à l'exposition, à la sensibilité et à la faible capacité d'adaptation (GIEC, 2007).

Selon Issa (2012), la multiplication des événements climatiques extrêmes est le fait du réchauffement global consécutif à l'émission massive et continue des gaz à effet de serre (GES), notamment le CO₂, par les activités humaines. Si les tendances actuelles d'émission desdits gaz se maintenaient, la température de la planète

augmentera de 1,5 à 6 °C d'ici à l'an 2100 (GIEC, 2001). Une amplification des phénomènes extrêmes dans les régions intertropicales, aura des impacts sur les écosystèmes (GIEC, 2001 ; FAO, 2002,).

Des études globales et locales menées en Afrique de l'ouest par différents auteurs (Hubert *et al.* ; 1989; Mahé & Olivry, 1995; Servat *et al.*, 1999; Paturel *et al.* ; (2002 et 2004) ; Motha *et al.*, 1980 ; Fontaine ,1981 ; Janicot ,1985 ; Boko ,1988 ; Samba-Kimbata ,1991, Bakam , 1996 ; Bigot *et al.*, 1998, Houndénou ,1999 ; Ndjendolé, 2001, Philippon ,2002, Sighomnou ,2004 ; et Brou ,2005 ; Ogouwale, 2006 ; Vissin ,2007 ; Ogouwale, 2006 ; Amoussou , 2010 ; Issa, 2012), mettent en évidence les impacts de la persistance de la variabilité climatique sur les ressources en eau et l'environnement.

Les indicateurs sont l'augmentation et la multiplication d'événements météorologiques extrêmes : sécheresses, précipitations intenses, vents violents etc. (PNUD, 2008). Ces événements météorologiques extrêmes s'avèrent désastreux pour les communautés rurales dépourvues de solutions durables de lutte contre ces phénomènes. Les populations pauvres ou affaiblies sont les victimes de ces catastrophes.

Au Bénin, la plupart des écosystèmes des différentes régions agro écologiques sont marqués par une dégradation du fait de la forte variabilité climatique associée à une plus grande fréquence des phénomènes extrêmes (sécheresse, augmentation des températures, etc.) au cours des trois (03) dernières décennies (Boko, 1988 ; Afouda, 1990 ; Issa, 1995 ; Ogouwale, 2004 ; Issa, 2012). Les populations majoritairement rurales sont particulièrement vulnérables aux risques liés à la variabilité climatique dans la mesure où celle-ci conditionne les ressources alimentaires, hydriques et financières avec des retombées directes et indirectes sur la santé publique.

Le bassin versant de la Sota englobant les zones agro-écologiques I, II, III ; a subi, au cours de ces dernières années des conditions difficiles relatives à l'environnement, et à l'agriculture. De même, il est aussi confronté à des problèmes de déforestation, de dégradation des terres et de vulnérabilité des écosystèmes (IFDC, 2006). Ce bassin versant bien qu'étant une zone de production agricole (vivrière et de rente) est sujette à de nombreux risques liés aux variations

hydroclimatiques. Il en va donc que le potentiel de croissance de l'économie du milieu en particulier et du Bénin en général, se trouve menacé car l'économie nationale dépend dans une large mesure du secteur agricole qui est très tributaire de la pluviométrie (DSRP, 2002). Ce secteur compte pour près de 39 % dans la formation du PIB (PNUD, 2003). Il est donc nécessaire de déterminer des risques hydroclimatiques majeurs et de leurs impacts sur les écosystèmes afin de renforcer les réponses adaptatives mises en place par les populations et les pouvoirs publics au niveau local. C'est dans cette logique que le sujet « Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri» a été choisi dans le cadre de cette étude. Le développement de la présente thèse s'est fait en six chapitres regroupés en trois parties :

La première partie rassemble les deux premiers chapitres est intitulé : cadre théorique, conceptuel et approche méthodologique de la vulnérabilité du bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri aux risques hydroclimatiques

Le premier chapitre est consacré au cadre théorique, fondements physiques et humains de la vulnérabilité du bassin versant de la Sota aux risques hydroclimatiques. Dans un premier temps, il s'agit de faire une justification du sujet à travers la problématique du sujet et les objectifs de la thèse. Cette justification est suivie des fondements physiques et humains de la vulnérabilité des risques induits par les variations sur les populations.

Le second chapitre quant à lui, aborde le cadre conceptuel et méthodologique à travers les techniques de collecte des données et informations, de même que les outils de traitement utilisés.

La deuxième partie intitulée : caractérisation de la variabilité hydroclimatique et influence des risques hydroclimatiques sur les écosystèmes du bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri regroupe les chapitres III et IV.

Dans le troisième chapitre, il a été procédé à l'étude de la dynamique hydroclimatique dans le bassin versant de la Sota a l'exutoire de Coubéri ;

Dans le quatrième chapitre, l'analyse de l'influence des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota a été faite.

Les deux derniers chapitres rassemblés dans la troisième partie abordent la perception des manifestations des risques hydroclimatiques et les stratégies d'adaptation dans bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri

Le cinquième chapitre intitulé "perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota présente les différentes perceptions qu'ont les populations des manifestations des risques hydroclimatiques et les limites liées à ces perceptions.

Enfin le sixième chapitre aborde intitulé "mesures d'adaptation aux risques hydroclimatiques dans bassin versant de la Sota", aborde les stratégies d'adaptations développées dans le bassin versant par les populations pour réduire les conséquences liées aux risques hydroclimatiques.

**PREMIERE PARTIE
CADRE THEORIQUE, CONCEPTUEL ET APPROCHE
METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT
DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI AUX RISQUES
HYDROCLIMATIQUES**

CHAPITRE I :

CADRE THEORIQUE CONCEPTUEL , FONDEMENTS PHYSIQUES ET HUMAINS DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES

La vulnérabilité d'une communauté aux risques hydroclimatiques dépend des caractéristiques physiques et socio-économiques propres à son territoire. Ainsi, les impacts des extrêmes climatiques sont ressentis différemment en fonction des caractéristiques physiques du bassin versant et socio-économiques des communautés vivants dans le bassin versant. Ce chapitre est consacré au cadre théorique dans lequel une justification du sujet a été faite à travers les objectifs visés et les hypothèses émises pour vérifier les objectifs. Il est suivi de la description des fondements physiques et humains qui concourent à la vulnérabilité du bassin versant de la Sota aux risques hydroclimatiques et enfin la synthèse bibliographique et la clarification des concepts clés indispensables à la compréhension du sujet ont été abordées.

1-1.Cadre théorique

Dans le cadre théorique, sont abordée la justification du sujet à travers la problématique, les hypothèses et les objectifs fixés au regard des questions de recherche. Cette justification est suivie d'une clarification des concepts utilisés et d'une revue de la littérature disponible sur les variabilités hydroclimatiques et les risques induits par ces variations sur les populations.

1-1-1. Problématique

Les variations climatiques et les incidences sur les principales composantes environnementales constituent l'un des plus grands défis auxquels l'humanité fait face au cours du 21^è siècle (Niasse, 2007). Le rapport du GIEC (2007) est encore plus alarmant : le réchauffement moyen des 100 dernières années est passé de 0,6 °C en 2001 à 0,74 °C en 2010. Ces manifestations se traduisent par une augmentation de l'occurrence des phénomènes extrêmes qui accélèrent la dégradation du couvert végétal et favorisent l'érosion, accélérant ainsi les mécanismes de désertification. En retour, les modifications de la végétation et la dégradation des terres ont des effets sur le climat dans la mesure où un sol mis à nu

accroît l'évaporation et réduit la pluviométrie (OSS, 2007). Depuis plusieurs décennies, les régimes pluviométriques des régions d'Afrique de l'ouest connaissent une baisse de plus de 20 % par rapport aux niveaux de 1960. En Afrique Tropicale, d'importantes études sur la variabilité et les fluctuations climatiques en relation avec le développement et l'environnement ont été menées par plusieurs auteurs dont : Motha et *al.*, (1980), Fontaine (1981), Janicot (1985), Boko (1988), Samba-Kimbata (1991), Bakam (1996), Bigot et *al.*; (1998), Houndénou (1999), Ndjendolé (2001), Philippon (2002), Sighomnou (2004), Brou (2005), Vissin (2007), Amoussou (2010) et Totin (2010). Ces auteurs, ont montré l'existence d'une opposition de phase entre les anomalies pluviométriques du Golfe de Guinée et celles des régions de Grands Lacs à partir des séries de la Côte d'Ivoire, du Bénin, du Nigeria et des deux Congo. La tendance à la baisse des totaux annuels dans un champ pluviométrique relativement homogène a été observée.

De même, selon l'UICN (2003), la zone ouest-africaine a connu une baisse importante des totaux pluviométriques au cours des dernières décennies. C'est ainsi qu'une rupture nette des séries pluviométriques a été observée autour des années 1968-1972, avec l'année 1970 comme année charnière. Dans toute la région, la baisse des hauteurs pluviométriques résulte de la diminution du nombre d'événements pluvieux (Lebel et *al.*, 1999). Janicot et *al.*, (1995) avaient mis en évidence une diminution des précipitations dès la fin des années 1960 et au début des années 1970, qui s'est étendue à l'ouest et aux régions nord proche du Sahel au cours de la décennie 1970 -1980. Selon ces auteurs, cette baisse pluviométrique s'est également généralisée à l'Est du Golfe de Guinée avec des amplitudes variables. Cette baisse se manifeste par une modification du régime des précipitations et par une diminution des hauteurs annuelles. Elle s'est intensifiée au cours des années 1970 et 1980 avec une légère reprise de la pluviométrie dans les années 1990. Certains auteurs comme Brooks cité par Niasse (2007) et (Amoussou , 2010) avaient décelé ce retour à une phase humide depuis le début des années 1990. Mais il n'a jusqu'à présent pas encore permis d'inverser cette tendance à la baisse des précipitations des années 1970 et 1980. Servat et *al.*, (1997) ont affirmé que bon nombre de zones de savane sont passées du régime pluviométrique "guinéen" à un régime "soudanien " plus sec.

Les variabilités climatiques actuelles se caractérisent par de longues périodes de sécheresse avec pour conséquences des effets négatifs sur le cycle hydrologique, l'environnement et les activités socio-économiques (FAO, 2007 ; IPCC, 2007). Le déficit des apports en eau a été estimé à 16 % pour l'Afrique tropicale (16% durant la décennie 1980 contre 7 % au cours de la décennie 1970). Au niveau de l'Afrique soudano-sahélienne, ce déficit est de l'ordre de 27 % et 13 % respectivement pour ces mêmes décennies (Bricquet et *al.*, 1997).

Des études sur l'impact des variabilités hydroclimatiques ont montré qu'elles ont des effets très sévères sur certaines régions du globe (Hansen et *al.*, 2008; Matthews et Caldeira, 2008; Solomon et *al.*, 2009; Allen et *al.*, 2009). Katz et Brown (1992) et Beniston et *al.*, (2007). Ces auteurs évoquent l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les sécheresses, les inondations et les pluies très intenses. En effet, les événements extrêmes (crues, sécheresses, changements brusques de températures) ponctuent la variabilité et le changement climatiques et semblent devenir plus fréquents en Afrique de l'Ouest (UICN-BRAO, GWP-WAWP, CILSS, 2003). Ces événements climatiques extrêmes, sont vraisemblablement appelées à croître aussi bien en magnitude qu'en fréquence (Enda-tiers monde, 1997). Les écosystèmes naturels et les activités agricoles, principales sources de revenus et d'alimentation des populations en sont affectés, surtout en Afrique de l'Ouest où l'agriculture constitue la principale source de subsistance pour la plupart des ruraux, mais elle est également l'activité humaine la plus directement touchée par la variation climatique (FIDA, 2008).

Au Bénin, comme dans la plupart des régions ouest africaines, les productions agricoles sont fortement tributaires des précipitations. Les variations pluviométriques constituent une grande menace pour les populations. Les scénariis d'évolution du climat en Afrique de l'Ouest indiquent que la variabilité climatique va s'amplifier et s'intensifier. Sécheresses et inondations vont non seulement devenir plus fréquentes mais également de plus grande ampleur (Niasse et *al.*, 2007). D'ici à 2100, les pertes estimées dans le secteur agricole varieront entre 2 et 4 % du PIB régional (Perret, 2007).

A l'instar des autres bassins versants du Bénin, le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri a connu plusieurs événements extrêmes liés aux variabilités climatiques actuelles. Ces perturbations deviennent de plus en plus fréquentes, intenses et génèrent des impacts importants notamment en matière de pertes en

vies humaines, de diminution de la production agricole et animale, de destruction des infrastructures, de dégradation des ressources naturelles (eaux, sols et forêts) rendant ainsi précaires la sécurité alimentaire, l'alimentation en eau potable et l'irrigation, la santé publique et la gestion des écosystèmes et du mode de vie (Bokonon-Ganta, 2001). Ces impacts mettent les populations et leurs activités de développement en situation de vulnérabilité répétitive et croissante.

Face aux différents risques liés à l'occurrence des phénomènes extrêmes (sécheresse, vents, ennemis des cultures, etc.), diverses réponses ont été apportées. Des efforts significatifs d'adaptation ont été entrepris dans tous les secteurs aux échelles aussi bien locales que nationales. Les paysans ont développé des stratégies d'adaptation. Parmi ces stratégies, figurent celles relatives aux pratiques agricoles comme la lutte contre la dégradation des terres agricoles, la gestion de la fertilité des sols, les techniques de gestion de l'eau, la diversification des cultures, etc. A cela s'ajoutent d'autres formes d'adaptation : production et vente d'animaux, entraide et coopération, diversification des activités, migration saisonnière, etc. De même, l'agriculture extensive est considérée comme une stratégie visant à compenser la baisse des rendements en l'absence d'une amélioration des itinéraires techniques de cultures. Mais les crises socioéconomiques récentes viennent accentuer la persistance de la vulnérabilité de la région aux risques hydroclimatiques.

Dans le bassin versant de la Sota, sujette à une sahélistation marquée par des migrations des isohyètes vers le Sud et aux problèmes environnementaux dus à variations hydroclimatiques extrêmes, des questions importantes de développement durable de toute la région se posent.

- Comment se manifeste la dynamique hydroclimatique dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri?
- Quels sont les risques hydroclimatiques majeurs qui menacent les écosystèmes dans le bassin versant de la Sota?
- Quels sont les effets des risques hydroclimatiques sur les activités socio-économiques et les services écosystémiques?

Pour répondre à ces interrogations, les objectifs suivants ont été formulés.

1-1-2. Objectifs de recherche

L'objectif global de cette recherche est de déterminer la vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Spécifiquement il s'agit de :

- caractériser la dynamique hydroclimatique dans le bassin versant,
- analyser les risques hydroclimatiques majeurs dans le bassin versant;
- caractériser la vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant,
- analyser les stratégies d'adaptation et de mitigation développées par les populations dans le bassin versant.

1-1-3. Hypothèses de travail

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, les hypothèses ont été formulées :

- Le bassin versant de la Sota est soumis à la dynamique des paramètres hydroclimatiques;
- les événements hydroclimatiques exceptionnels produisent des inondations catastrophiques et des sécheresses dans le bassin versant ;
- les populations et leurs activités socio-économiques sont vulnérables aux risques hydro-climatiques ;
- les populations dans le bassin versant ont développé des stratégies pour réduire la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques.

1-2. Fondements physiques et humains de l'étude

Cette partie présente le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri à travers les fondements physiques (climat, sols, formations végétales structures hydro géomorphologiques etc.) et humains (dynamique démographique, différents secteurs d'activités) qui conditionnent la vulnérabilité du bassin versant de la Sota aux risques hydroclimatiques

1-2.1. Situation géographique du bassin versant de Sota

Le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri est situé au Nord-est du Bénin. Il est localisé entre 9°54' et 11°45' de latitude nord et entre 2°28' et 3°52' de longitude est (Codjia, cité par Vodounnou, 2009). Sa superficie couvre 13410 km², soit 11 %

de celle du Bénin et regroupe les sous bassin versants de Sota à l'exutoire de Gbassè (8300 km²) et de Sota à l'exutoire de Coubéri (13410 Km²). Il est limité au Nord et par le sous bassin versant du Niger à Malanville, au sud par le bassin versant de l'Ouémé, au Sud- est par le bassin versant de Za, à l'Ouest par le bassin versant de l'Alibori et à l'est par les sous bassins versants de Nogourou, de Quinté et d'Ana (figure 1). Il couvre les communes de Malanville, Ségbana, Kandi et Gogounou dans le département de l'Alibori et les Communes de Bembèrèkè, Kalalé et Nikki dans le département du Borgou.

Le choix de ce bassin versant se justifie par le fait qu'il est une zone de forte production agricole. Cette agriculture principalement de subsistance est axée presque essentiellement sur la production céréalière et cotonnière qui elle-même dépend des conditions climatiques extrêmes. Les autres secteurs économiques ne sont pas aussi épargnés par ces phénomènes extrêmes. Ainsi par exemple dans le domaine de l'élevage, la capacité de charge liée à la longueur et à la sévérité de la saison sèche est-elle fréquemment rompue dans le bassin versant. Le bassin versant est donc sous la menace permanente de l'occurrence des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (inondation et sécheresse) observés ces dernières années.

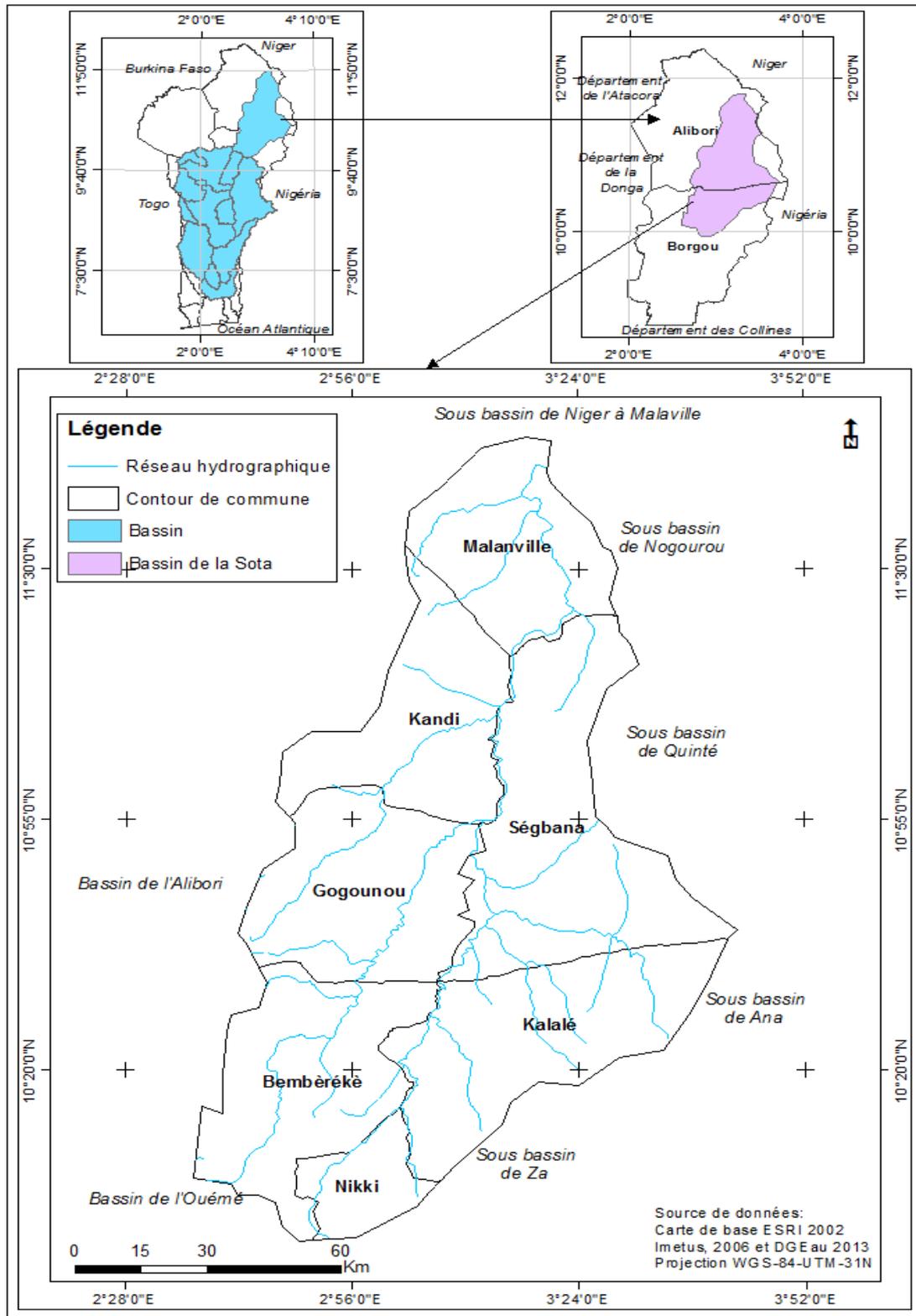


Figure 1: Situation du bassin versant de la Sota

1-2.2. Fondements physiques du bassin versant de la Sota

Les fondements physiques comprennent la description du réseau hydrographique, les différentes formations hydrogéologiques, le relief, les formations végétales et les caractéristiques climatiques dans le bassin versant.

1-2.2.1. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous affluents permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange (exutoire) du bassin versant (Fares, 2012). Le réseau hydrographique représente l'élément le plus important dans la caractérisation des risques hydrométéorologiques.

Le réseau hydrographique dans le bassin versant est constitué de la rivière Sota longue de 254 Km et ses affluents (figure 2). La Sota prend sa source à plus de 400 m d'altitude sur les flancs est du plateau gréseux de Kalalé qu'elle va contourner par le nord avant d'emprunter la direction SSW-NNE sur les formations du socle. 90 km après sa source, elle pénètre dans les formations gréseuses du Crétacé qu'elle entaille assez profondément et rejoint après 254 km de parcours, le Niger à 1km en aval de Malanville (Le Barbe et *al.*, 1993).

Cette rivière reçoit successivement le Souamon sur sa rive gauche, le Tassiné (long de 102 km avec une superficie de 3031 km²), le Bouli (145 km de long et 2380 km² de superficie), l'Irané (55 km de long et 1832 km² de superficie), le Gouroukpa et la cascade de Sosso sur sa rive droite. En aval de Coubéri, la Sota serpente sur 15 km dans les alluvions de la vallée du Niger avant de confluer avec ce dernier à 1 km en aval de Malanville. (Figure 2). Le réseau est très peu dense sur les formations gréseuses. En revanche, sur les granites et sur les formations gneissiques, le réseau hydrographique est beaucoup plus important (Le Barbe et *al.*, 1993 ; Vissin, 2007.).

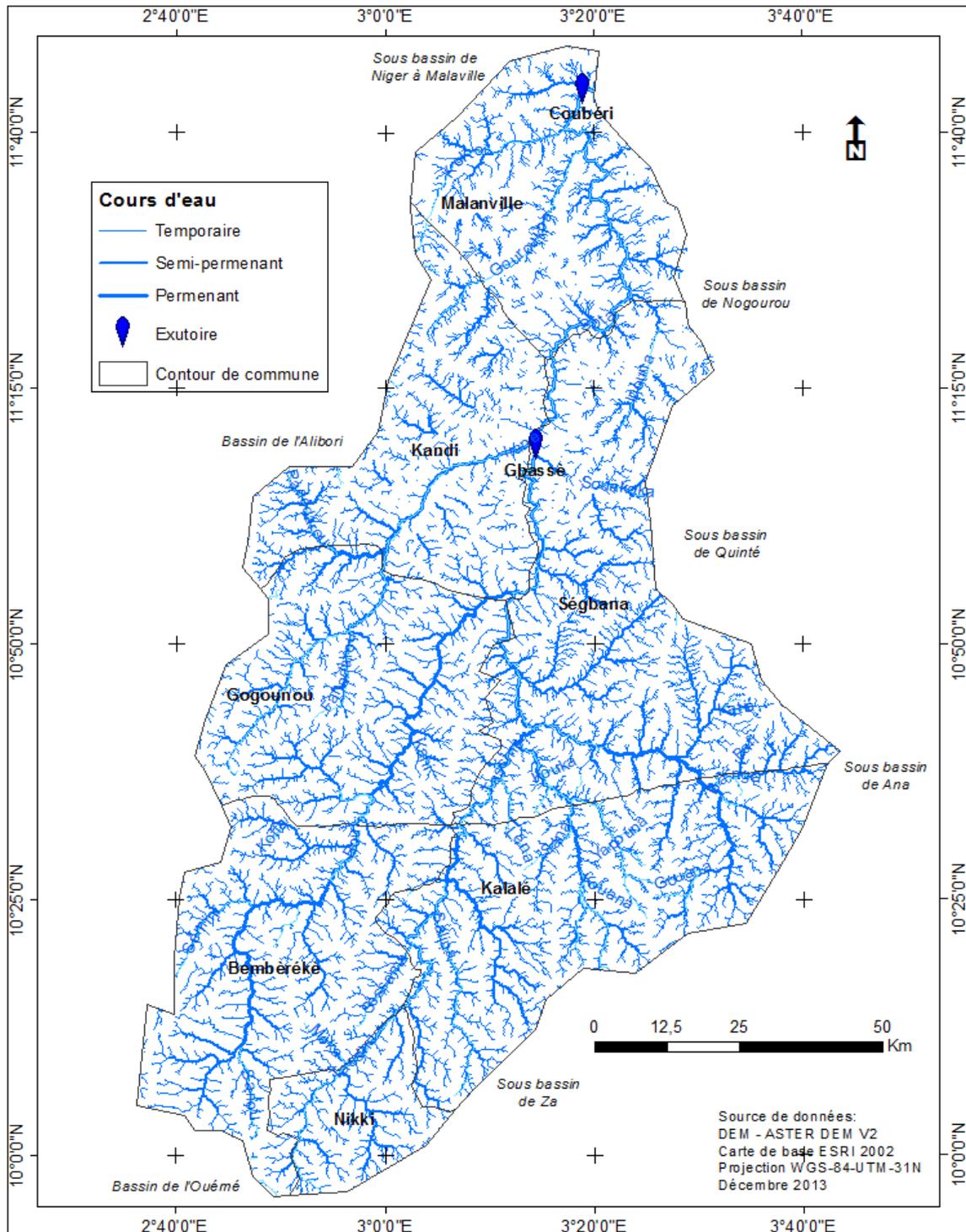


Figure 2: Réseau hydrographique du bassin versant de la Sota

1-2.2.2. Contexte hydrogéologique

La géologie des terrains influe non seulement sur le ruissellement des surfaces mais également sur l'écoulement de l'eau souterraine. Dans le premier cas, l'étude des composantes géologiques d'un bassin versant dans le cadre de l'étude des risques

hydroclimatiques permet de déterminer la perméabilité des formations lithologiques. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume, ainsi que sur l'aggravation du phénomène d'inondation.

D'une manière générale, la structure géologique dans le bassin versant de la Sota permet d'individualiser deux formations géologiques du sud au nord à savoir : les formations du socle et des grès sédimentaires de Kandi (Le Barbé *et al.*, 1993 ; Adam et Boko, 1993, Vissin, 2007). Le bassin versant supérieur de la Sota (sous bassin versant de la Gbassè), s'étend sur des formations du socle granito-gneissique précambrien comprenant essentiellement des gneiss, des migmatites, des micaschistes, des diorites et quelques quartzites accompagnés localement de granites (figure 3). Ce socle s'abaisse graduellement vers le nord-est et est surmonté en discordance par 20 % d'un ensemble gréseux appelé grès de Kandi (Le Barbe *et al.*, 1993 ; Vissin, 2001).

Les roches du socle sont imperméables, en dessous d'une zone d'altération importante. Les études antérieures (Lessard, 1964 ; Le Barbé *et al.*, 1993 ; Vissin 1998), montrent que le potentiel en eau des aquifères varie en fonction des roches en présence. Ces aquifères sont cantonnés dans les couches d'altération qui surmontent les altérites et la roche saine sous-jacente. Leur puissance varie de 5 à 20 m, mais peut atteindre 30 m au niveau des fractures.

Selon Lessard cité par Vissin (2007) , les bassins versants inférieur et moyen de la Sota, au nord de Gbassè sont constitués d'un mélange de conglomérats de diorite, de gneiss et de migmatites surmonté d'une variété de grès qui couvre plus de 93 % de la superficie du sous bassin versant de la Sota à Coubéri. Les formations de grès de Kandi selon Alidou et Lang (1978), reposent en discordance sur le socle précambrien par l'intermédiaire d'un conglomérat de base ou d'un grès grossier conglomératique. On distingue d'une part les formations de Wèrè et de Goungoun qui se sont déposées à l'Ouest du bassin versant et d'autre part les formations de Kandi et de Sinendé à l'Est.

Une coupe géologique sud- nord dans le sous bassin versant de la Sota (Vissin, 1998 et 2007) permet de distinguer de bas en haut (figure 3):

- des grès sableux, fins à moyens, très tendres, légèrement arkosiques (grès feldspathiques résultant de la cimentation d'une roche granitique ou gneissique) vers la base, d'une épaisseur de 40 m environ, visibles à partir du talweg ;

- des grès grossiers et des silts (sédiments meubles très fins, plus ou moins consolidés), blancs ou violacés, comportant à leur base des grès argileux en plaquettes, de 10 m d'épaisseur environ ;
- le continental terminal (conglomérats et brèches, grès, silts).

Ces faciès gréseux ont un degré de perméabilité assez importante (à cause de leur porosité) et possèdent des réservoirs appréciables. Leur potentiel aquifère n'est pas négligeable. C'est d'ailleurs dans les bassins versants gréseux que les étiages sont plus soutenus : ils sont supérieurs à 4 m³/s à Coubéri ; à 0,63m³/s à Gbassè (Le Barbe et *al*, 1993).

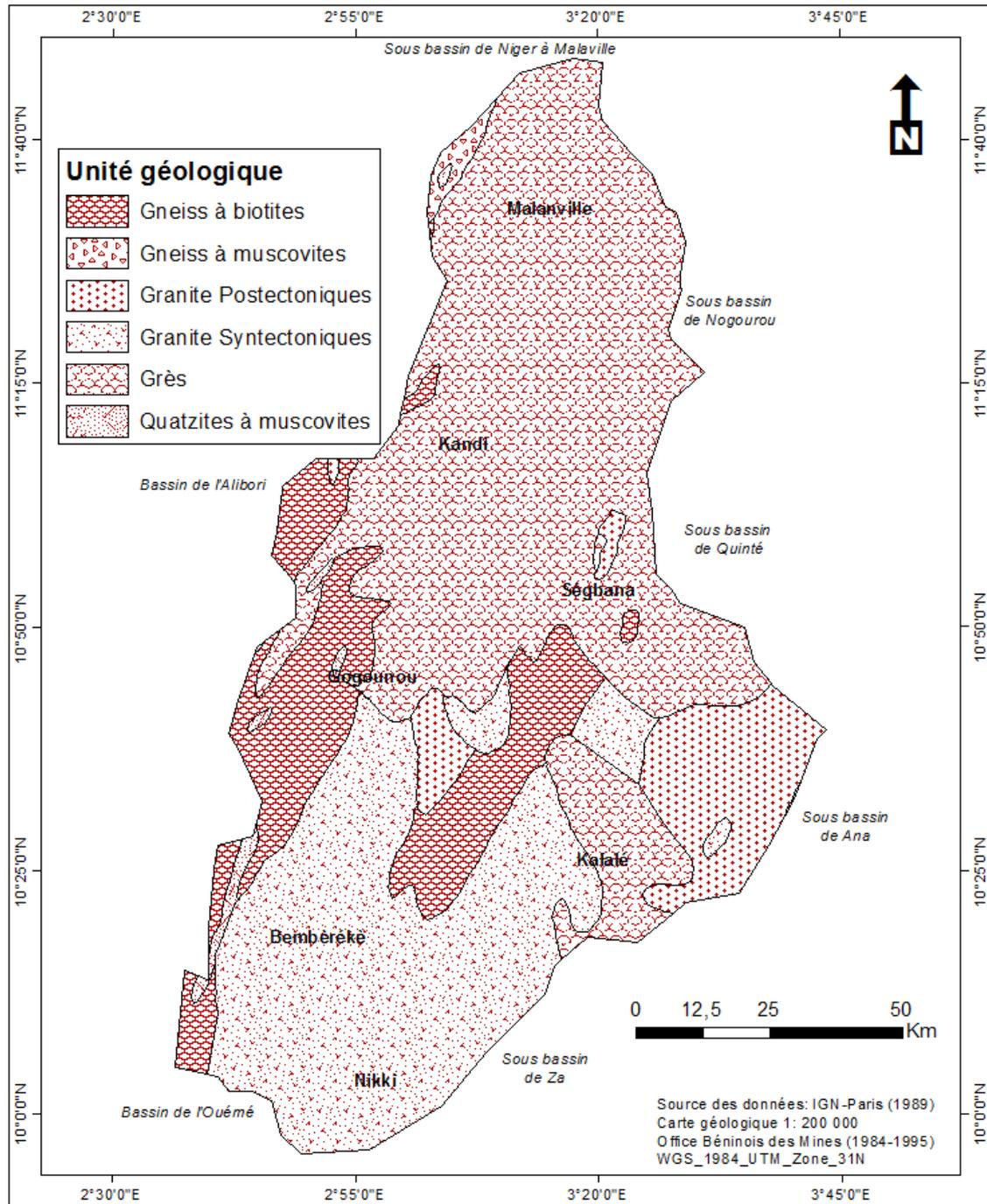


Figure 3: Unités géologiques dans du bassin versant de la Sota

1-2.2.3. Formations pédologiques

Le manteau pédologique résulte généralement de l'action combinée de plusieurs facteurs : le climat, les formations végétales, la nature et l'altération du substratum géologique, mais aussi et surtout, de l'action anthropogénique. Quant à son aptitude culturale, elle dépend essentiellement de sa capacité de rétention en eau, elle-même

fonction de sa granulométrie ou de sa texture, et de sa teneur en matière organique (Roose cité par Noufe ; 2011).

Dans le bassin versant de la Sota, les matériaux originels constitutifs des sols (figure 4) ont des origines variées. Il s'agit, soit de matériaux d'apport d'origine alluviale ou colluviale récent, soit de matériaux sédimentaires anciens, soit de matériaux d'altérations dérivant du socle granito-gneissique sous-jacent (Viennot cité par Vissin, 2007).

D'après Le Barbe et *al*, 1993, Dubroeuq (1978), Faure (1977a et b) et Viennot (1978 a et b), les sols des bassins versants du Nord-Bénin résultent essentiellement de processus de ferrallitisation et de ferruginisation. Trois types de remaniement s'ajoutent : le lessivage, l'érosion et l'induration. Trois formations pédologiques importantes se partagent le bassin versant de la Sota:

- les sols faiblement ferrallitiques se développent sur les formations gréseuses plus ou moins ferruginisées dans la région de Kandi. Ils ont une teneur en argile de 10 à 40 % et un bon indice d'érodibilité, de 0.07 en surface, mais qui s'accroît en profondeur (0.1 à 0.2). Avec une perméabilité moins bonne par rapport à celle du Continental terminal, ils ont une réserve hydrique de l'ordre de 60 mm par mètre de profondeur. Ces sols sont peu profonds et cuirassés (sols formés par le processus d'induration des horizons d'accumulation suite à l'alternance de détrempe et de dessiccation). En dépit de leurs conditions physiques médiocres, la plupart de ces sols offrent d'assez bonnes propriétés chimiques, d'où leur intense exploitation pour les cultures (Agli cité Vissin, 2007) ;

- les sols hydromorphes, sols à pseudogley (rencontrés dans les vallées et les bas-fonds), le plus souvent de texture sableuse à sable grossier, sont des sols grumeleux ou grumelopolyédriques en surface, avec un indice d'instabilité structurale inférieur à un mètre. Cependant, au-delà de 20 cm de profondeur, cet indice est supérieur à 1,5. Ce sont en général des sols profonds (> 1 m) avec une perméabilité moyenne en surface de l'ordre de $13^{-4} 10^{-6}$ m/s. En profondeur, cette perméabilité est comprise entre 3 et 6 16^{-6} m/s. Leur érodibilité est moyenne, avec une valeur comprise entre 0.1 et 0.2. Les sols hydromorphes sont alluviaux et riches, favorables à la culture du riz. Leur évolution dépend de l'eau pluviale et de la remontée de la nappe phréatique (Le Barbe *et al.*, 1993). Selon les sites, la réserve hydrique est de l'ordre de 75 ou 100 mm à un mètre de profondeur ;

- les sols ferrugineux tropicaux, localisés sur le socle, sont caractéristiques d'un régime pluviométrique unimodal. Ils sont marqués par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes que celles des sols ferrallitiques. Ce sont des sols peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. Leur faible épaisseur, sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence de nappe phréatique. Toutefois, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère (Boko, 1992).

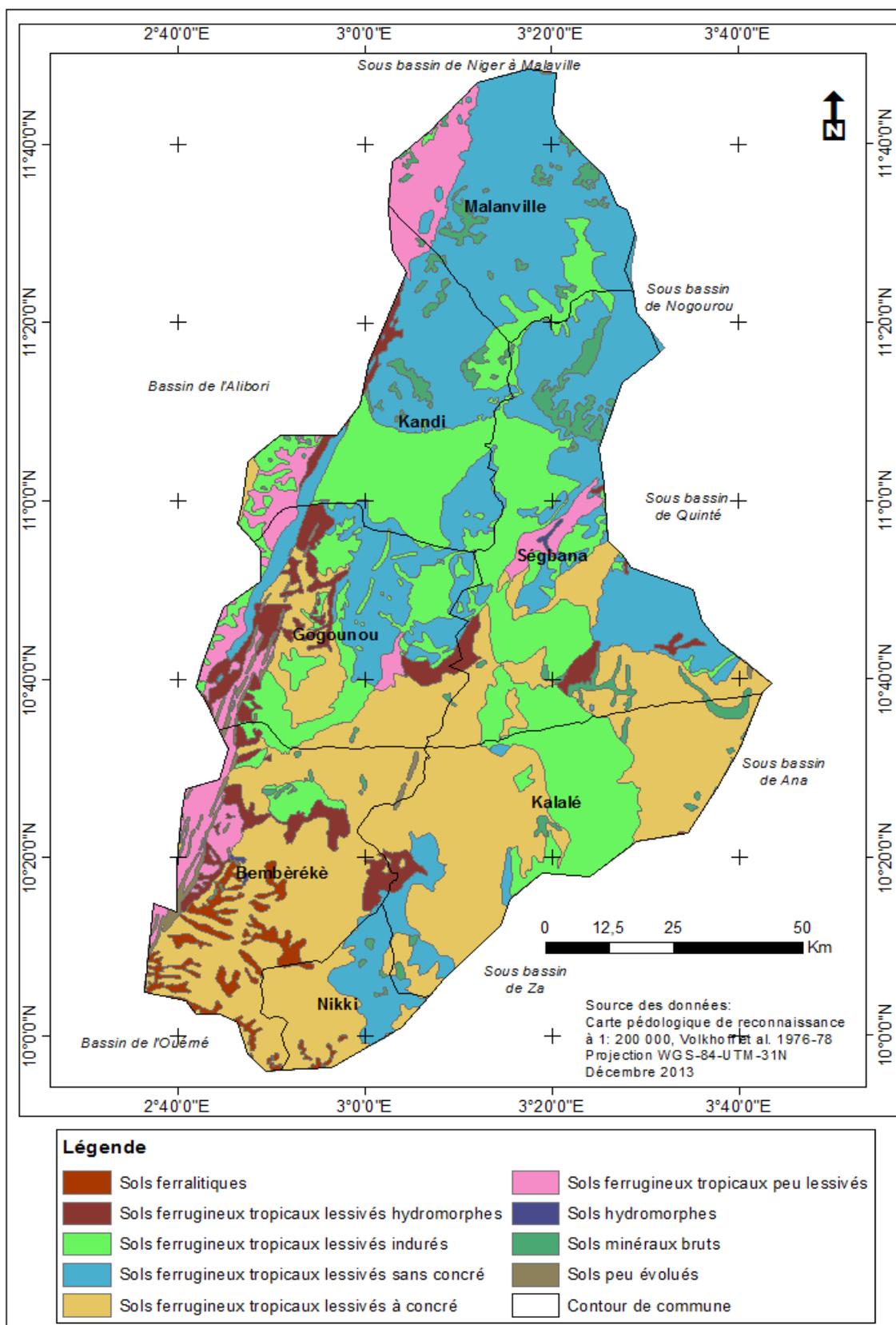


Figure 4: Formations pédologiques dans le bassin versant de la Sota

1-2.2.4. Relief

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et l'action de l'érosion à une grande échelle (Fares, 2012). Il est l'un des facteurs clés contrôlant la réponse hydrologique d'un bassin versant car les pentes influencent à la fois les vitesses et les puissances spécifiques des écoulements ainsi que le temps de réponse hydrologique (Wahiba, 2012).

L'altitude du relief dans le bassin versant de la Sota est généralement inclinée du sud vers le nord. Il est constitué des plateaux inclinés présentant des altitudes variant entre 169 m et 547 m, avec une moyenne de 296 m (figure 5). La partie sud est dominée par la pénéplaine dahoméenne, unité de relief dont deux éléments marquent le paysage :

- une dorsale d'orientation est-ouest à 10 ° de la latitude nord, est à mettre en rapport avec la ligne de partage des eaux entre les rivières du bassin versant de l' Ouémé et les affluents de la rive droite du fleuve Niger (Vissin,2007);
- une série de collines correspondant aux roches les plus dures du Dahomeyen et qui suivent de ce fait les directions géologiques. Il s'agit des inselbergs subquartzitiques du groupe de Badagba (colline de Bembèrèkè) et des plateaux de cuirasses anciennes sur les roches basiques du groupe de Pira et de Kandi essentiellement. Par contre, la partie nord est constituée de plateaux gréseux dont celui de Kandi. Ces grès continentaux du Crétacé qui constituent ces plateaux, que résistants à l'érosion, et se développent sur un relief où des vallées encaissées sont dominées sur des plateaux d'altitude relativement élevée.

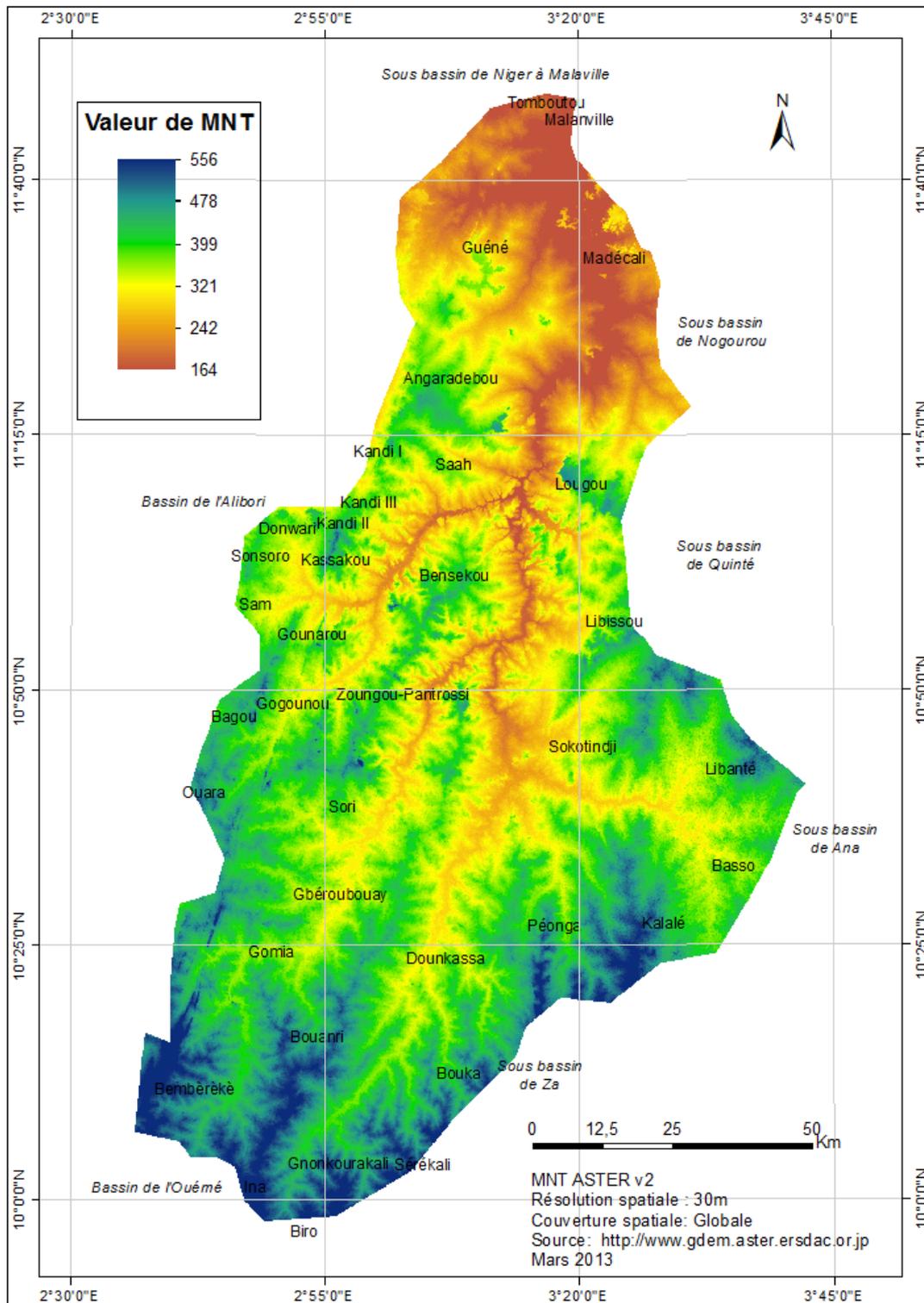


Figure 5: Altitude (m) établie à partir d'un MNT de la Sota

1-2.2.5. Couvert végétal dans le bassin versant de la Sota

Les formations végétales jouent un rôle essentiel dans la protection du sol. Elles exercent une protection mécanique directe sur l'écoulement fluvial, en diminuant la

force vive des eaux et en favorisant leur infiltration ; cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense, les eaux qui ruissellent rencontrent des obstacles qui les obligent à ralentir leurs vitesses (Fares, 2012). Enfin, elle donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité et l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol, l'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées au sein du sol. La répartition des différentes formations végétales naturelles sur la zone d'étude tient à leur situation topographique et à leur affinité hydro-pédologique. La végétation dans l'ensemble du bassin versant de la Sota, devient progressivement plus clairsemée du sud vers le nord. Ainsi, dans le sud, il y a la savane arborée qui comprend en général un ensemble assez dense d'arbres pouvant atteindre dix mètres, avec une importante strate d'arbustes et un tapis de graminées s'opposant au ruissellement. La taille et la densité des arbres décroissent vers le nord (Le Barbé et *al.*, 1993). Sur les grès de Kandi se développent des savanes arborées et des savanes arbustives à *Adansonia digitata* et à *Combretum spp* (de Souza, CNRSS, cité par Vissin, 2007). Le bassin- versant de la Sota abrite les forêts classées de Goungoun (73476 ha), de la Sota (53678 ha) et des Trois rivières (265595 ha) (CENATEL, 1998). Les forêts claires sont composées des espèces telles que *Daniellia oliveri*, *Terminalia spp*, *Tamarindus indica*, *Isobertinia doka*, etc. Quant aux graminées, elles sont sous l'emprise des activités pastorales. Le long des cours d'eau se développe une galerie forestière caractérisée par des espèces telles que : *Khaya senegalensis*, *Khaya grandifolia*, *Diopyrosmes piliformis*, *Azelia africana*.

1-2.2.6 Contexte climatique du bassin versant de la Sota

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans le régime d'un cours d'eau, ce sont les précipitations, qui constituent le facteur essentiel intervenant dans la répartition annuelle et mensuelle et surtout les averses génératrices des crues. Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon un effet combiné des autres paramètres physiques (altitude et exposition) et climatiques : la température, l'évaporation, l'évapotranspiration, les vents et l'humidité aussi ; des facteurs qui influent sur l'écoulement et le régime hydrologique du bassin versant.

Dans une zone d'agriculture pluviale comme celui du bassin versant de la Sota, la pluviométrie rythme la vie des écosystèmes. Toutefois, pour comprendre la « succession habituelle des types de temps » dans cette zone, il importe

principalement de se placer à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et d'étudier les mécanismes essentiels qui président à la circulation atmosphérique et au déroulement des types de temps qui affectent l'ensemble du sous-continent ouest africain. De par sa position le bassin versant de la Sota est soumis, comme l'ensemble du bassin versant du Niger, à l'influence permanente des principaux centres d'action atmosphérique qui commandent la circulation de la mousson Ouest Africaine.

Selon le modèle de circulation générale à 3 cellules convectives, le régime climatique de l'Afrique de l'Ouest est déterminé par la cellule de Hadley (Gallée *et al.*, 2004). 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 Intertropicale (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. 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 projeté en altitude. D'importants cumulonimbus dont les sommets dépassent parfois la tropopause et atteignent 18000 m se développent. La genèse de ces nombreux systèmes précipitants convectifs forme la "mousson africaine". La ZCIT, particulièrement bien marquée sur la moitié occidentale de l'Afrique, sépare la mousson de sud-ouest (anticyclone de Ste Hélène), chaude et humide, de l'harmattan, (vent saharien très sec et plus chaud) encore, à forte composante est (anticyclones des Açores). 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. Plusieurs facteurs influencent le déplacement de la ZCIT, mais c'est en août qu'elle occupe sa position la plus septentrionale (Sultan *et al.*, 2003 ; Sultan et Janicot, 2003). Sur le continent, la position de la ZCIT 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 8 ans), celle des précipitations connaît des déplacements importants (Grist et Nicholson, 2001). Le passage au sol du FIT détermine la saison des pluies et celle-ci est d'autant plus tardive et brève que l'on se déplace vers le nord.

La circulation générale de l'atmosphère au-dessus de l'Afrique de l'Ouest dépend à la fois des hautes pressions tropicales l'anticyclone des Açores, celui de Sainte-Hélène et l'anticyclone égypto-libyen (Boko; Agli; Houndenou cité par Vissin ,2007) et de l'équateur météorologique dont les migrations saisonnières déterminent les caractéristiques des flux d'air et les types de temps résultants.

La circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest a déjà été étudiée par plusieurs chercheurs, dont Leroux (1970, 1983, 1988), Janicot (1985, 1988, 1990a et b, 2004), Fontaine (1985, 1985, 1990 a et b), Moron (1991, 1992, 1993), Sultan (2002), et, Vissin (2007)

Ces auteurs ont examiné l'importance du climat pour les écosystèmes et la vie agricole. Par ailleurs Boko (1988) a montré que les fluctuations climatiques et les "chocs climatiques" ébranlent le système économique et social. De même, Sircoulon (1990) et Afouda (1990) rapportent que la dynamique du climat entraîne des bouleversements écologiques et génère une modification des systèmes cultureux.

Dans le bassin versant de la Sota, les phénomènes pluviogènes liés à la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest ont créé le climat tropical de type soudanien (Boko, 1988 ; Adam et Boko, 1993). Ce climat est caractérisé par une saison sèche d'octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à septembre (figure 6). Les hauteurs de pluies annuelles qui varient de 947 mm dans le sous bassin versant de la Sota à coubéri et de 1065 mm dans le sous bassin versant de la Sota à Gbassè

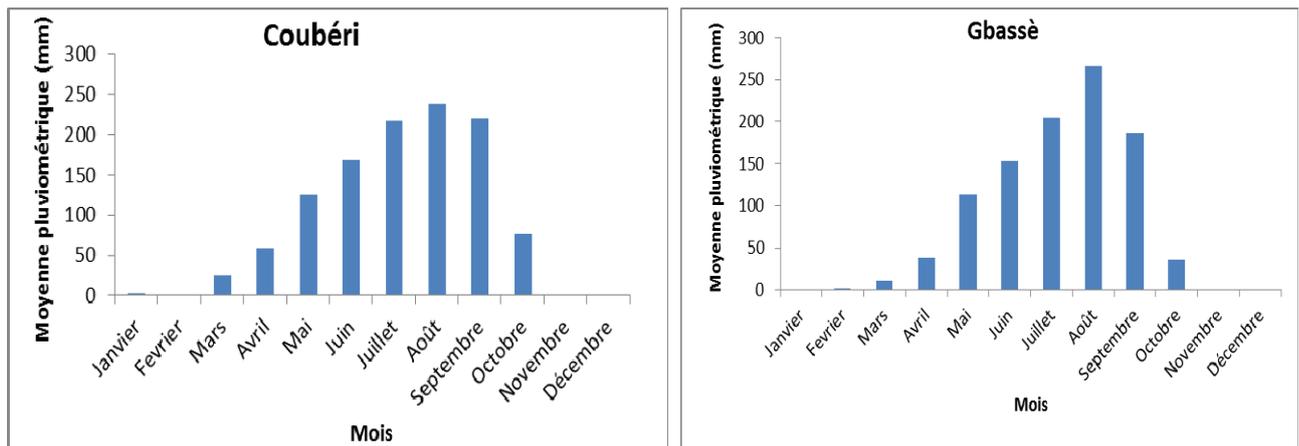


Figure 6: Régime pluviométrique mensuel des sous bassins versants de la Sota (1960-2010)

Source des données : ASECNA, 2012

1-3. Fondements humains de la vulnérabilité du bassin versant de la Sota

Les populations et les différentes activités qu'elles mènent sont les premières victimes des risques hydroclimatiques. En effet, elles sont les plus exposées aux conséquences des risques hydroclimatiques qui affectent le bassin versant. La dynamique démographique dans le bassin versant ainsi que les activités exercées par les populations sont abordées ici à travers les fondements humains dans le bassin versant.

1-3.1. Caractéristiques démographiques

L'étude de la dynamique de la population et des inégalités spatiales permet de déterminer les pressions exercées par cette population sur les écosystèmes et les transformations rapides de l'environnement (Noufe, 2011)

En effet, la pratique d'une agriculture extensive utilisant très peu d'intrants adaptés aux contraintes pédologiques, de même qu'une augmentation de la pression démographique a pour conséquence une augmentation des déboisements, une dégradation des sols et une réduction du temps des jachères. A contrario une faible densité permet une régénération rapide du couvert végétal, et une reconstitution naturelle du potentiel productif des sols. L'importance que requiert la croissance démographique dans la dynamique des écosystèmes, amène donc à s'intéresser aux données de population comme l'un des facteurs explicatifs de la vulnérabilité des écosystèmes.

La population résidente selon l'INSAE (2013) sur le bassin versant est estimée à 270.477 habitants. Elle est passée à 441099 en 1992 et à 1031420 habitants en 2002 (figure 7). Cette population d'après les résultats du dernier recensement générale de la population et de l'habitation est de 1075073 habitants en 2013 avec un taux d'accroissement de 3,9 %.

Cette population est formée d'une pluralité de groupes sociolinguistiques, inégalement répartis. Les principaux sont les Batonu (32,6%), les Fulbé (22,1%), les Dendi (18,2%), les Mokollé (4%) et les religions dominantes sont l'Islam (77%), le christianisme (8,7%), et l'animisme (4%) (INSAE, 2008).

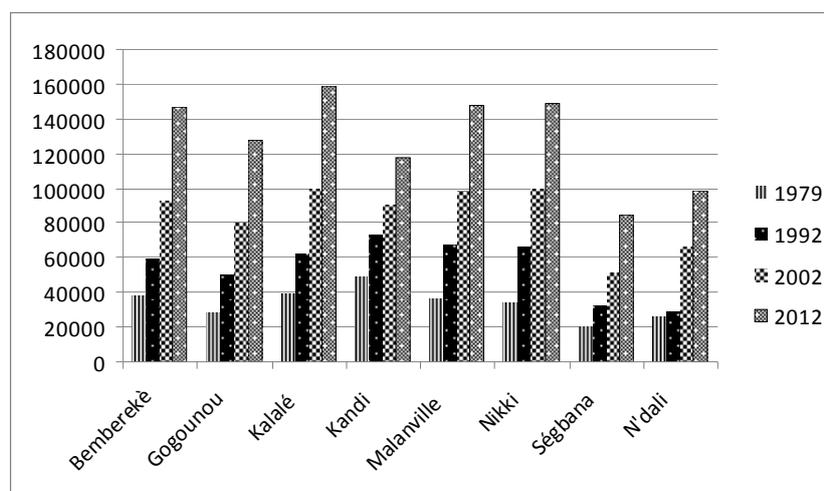


Figure 7: Evolution de la population par Commune (1979 à 2012)

Source des données: Annuaire: INSAE (RGPH 2 et 3)

1-3-2. Activités économiques dans le bassin versant

Des facteurs physiques (climat favorable et disponibilité des terres), favorisent la diversité des activités économiques menées par les populations dans le bassin versant de la Sota. Les activités économiques pratiquées regroupent tous les secteurs d'activités, le plus important aujourd'hui reste le secteur primaire. L'agriculture l'élevage et la pêche sont ainsi les principales activités du secteur primaire dans le bassin versant.

1-3-2-1. Agriculture

Comme dans les autres régions du Bénin, l'agriculture traditionnelle constitue la principale activité des populations du bassin versant de la Sota. Elle occupe presque la totalité de la population active soit environ 80 % (INSAE, 2013) (Figure 8). Les

principales cultures sont le coton (*Gossypium hirsutum*), le maïs (*Zea mays*), le sorgho (*Sorghum spp*) et le riz (*Oriza sativa*). On y cultive secondairement l'arachide (*Arachis hypogea*), le niébé (*Vigna unguiculata*), le soja (*Soja hispida*), l'igname (*Discorea alata*), le manioc (*Manihot esculenta*), la patate douce (*Ipomea batatas*), et le mil (*Pennisetum americanum*). On y rencontre aussi quelques plantations de Teck (*Tectona grandis*), d'acajou (*Anacardium occidentales*) etc.

Le développement des cultures vivrières et de rente assurent aux populations la subsistance et l'essentiel des revenus mais contribuent à la destruction des écosystèmes.

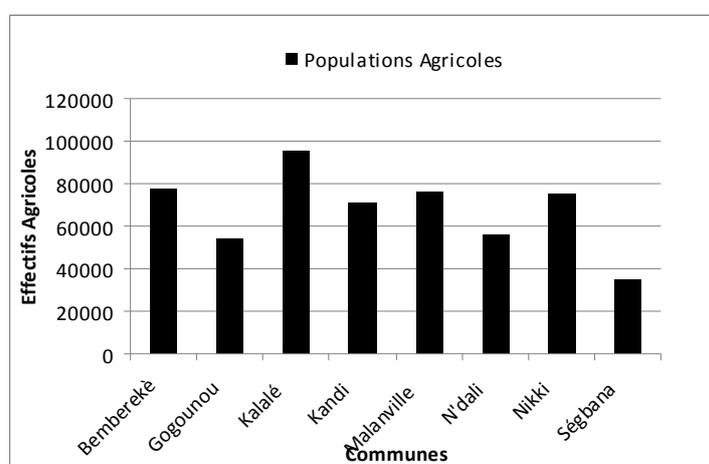


Figure 8: Effectifs de population agricole par Commune en 2006
Source des données: INSAE, (2006)

1-3-2-2. Elevage

L'élevage est développé dans le bassin versant et porte essentiellement sur les ruminants (bovins, ovins, caprins). L'élevage dans le bassin versant de la Sota est peu organisé. De mode extensif traditionnel, il constitue souvent une activité principale pour les fulbés et une activité secondaire pour quelques autres individus. Cette activité est surtout menée par les communautés peulhs. Au fil du temps, il apparaît une nouvelle catégorie d'éleveurs, les agro-éleveurs qui sont soit des éleveurs sédentarisés, soit des agriculteurs qui ont constitué des troupeaux de bovins intégrés à leurs exploitations agricoles (Djènotin et *al.*, 2001; Katé, 2001). La forte demande en viande, l'existence d'un cadre institutionnel pour les éleveurs et les revenus qu'il procure font de l'élevage conventionnel un secteur d'avenir. En outre, des structures locales comme la CLCAM (Caisse Locale de Crédit Agricole Mutuel), mobilisent

l'épargne locale provenant de la vente du bétail mais aussi du coton. La forêt classée des trois rivières est un atout d'un point de vue environnemental, mais son caractère protégé fait qu'elle devient une contrainte pour les producteurs à la recherche de terres cultivables et de pâturage.

Les systèmes d'exploitation des pâturages naturels sont le système transhumant, caractérisé par une grande mobilité et une faible association à l'agriculture et le système sédentaire associé à l'agriculture de subsistance ou de rente qui s'observe aux alentours des agglomérations et des aires de campement (Vodounon, 2010). Malgré l'existence de points d'eau, l'abreuvement du bétail dans l'élevage conventionnel pose des problèmes surtout en saison sèche. D'autre part, les pratiques agropastorales contribuent à la déforestation, à l'appauvrissement des sols, à la mauvaise gestion du pâturage, ce qui pose un problème de durabilité écologique. L'inexistence ou la mauvaise délimitation de couloirs de passage favorise la divagation des animaux, source de conflits réguliers entre agriculteurs et éleveurs. Tous ces problèmes liés à l'élevage dans le bassin versant de la Sota sont tout autant des contraintes à la production agricole.

1-3-2-3. Pêche

La pêche dans le bassin versant de la Sota est relativement développée. Elle se pratique de manière traditionnelle sur tout le long de la rivière Sota et sur certaines sections de ses affluents.

Depuis sa confluence avec le Niger dans la commune de Malanville jusqu'à la fin de la forêt classée de Goungoun dans la commune de Kandi, la rivière Sota se révèle une zone potentielle de pêche. Elle est active dans le village de Toumboutou où il existe une communauté d'une quarantaine de pêcheurs. Une autre zone activité de pêche s'observe à partir du village de Molla (commune de Malanville).

Il s'agit plus spécifiquement d'une activité artisanale de subsistance pratiquée individuellement et/ou en groupements par des pêcheurs béninois et des étrangers venus du Niger, du Mali, du Nigéria et du Togo. Globalement, près de 700 pêcheurs opèrent dans la zone du bassin versant. La commune de Malanville, à elle seule, compte plus de 400 pêcheurs dont la moitié est originaire du Niger et du Mali. Les engins et techniques de pêche utilisés pour la capture des poissons sont les filets (filet maillant, filet épervier), les lignes et les nasses. Une importante part de la

production est transformée (fumage) sur les lieux mêmes de pêche avant d'être commercialisée sur les principaux marchés de Malanville, Kandi et de Parakou.

Les produits de pêche sont constitués principalement des grands groupes de poissons suivants : *Citharinus*, *Clarias*, *Distichodus*, *Alestes*, *Labeo*, *Synodontis*, *Tilapia*, *Mormyrus*.

Malgré l'intervention de certaines structures en l'occurrence le programme d'appui au développement participatif de la pêche artisanale (PADPPA), la pêche est sujette à beaucoup de problèmes. Les grandes contraintes relatives au facteur d'eau (rareté, tarissement précoce, mauvais entretien de points d'eau, pollution) couplées aux moyens de production et de conservation rudimentaire voire archaïque font de la pêche un secteur à faible rendement. Il est en outre menacé par l'inondation du marché par des poissons congelés et la surexploitation des retenues d'eau par les pêcheurs étrangers.

1- 4 Point des connaissances

La revue de littérature est consacrée à la synthèse bibliographique des travaux scientifiques liés à la variabilité climatique, aux risques et la vulnérabilité des populations qui ont été faits dans la sous-région.

1- 4-1. Dynamique de la variabilité climatique

Les variations et changements climatiques sont de plus en plus cruciaux en Afrique, où ces effets éprouvent les efforts de développement des pays et concomitamment les moyens de vie des populations. Le changement climatique affecte toutes les communautés, mais pas de façon équitable. Les plus pauvres et les plus vulnérables sont ceux qui ont le moins contribué au réchauffement climatique mondial mais sont les plus touchés (Ban Ki Moon, 2007)

Kamagate *et al.*, (2010) : affirment que l'Afrique de l'Ouest, sous régime de mousson, est un vaste ensemble dont le climat est régi par le déplacement de la mousson atlantique. La phase d'installation de la mousson selon Sultan et Janicot, (2000), n'est pas continue, mais elle est plutôt modulée par des transitions abruptes entre les positions d'équilibre. Ces positions d'équilibre à 5° N et à 20°N marquent respectivement l'installation de la première saison des pluies en Afrique de l'ouest guinéenne et l'unique saison des pluies dans le domaine soudano-sahélien. Les travaux de Louvet *et al.*, (2003) réalisés dans le cadre du projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine), ont permis de mettre en évidence la

phase d'installation (montée) de la mousson sur le continent, qui est caractérisée par une alternance entre des séquences d'intensification des précipitations (phases actives) et des séquences de stagnation ou régression (phases inactives ou pauses). L'Afrique de l'ouest soumise au flux de mousson atlantique subit depuis plusieurs années une diminution de la pluviosité, comme le mettent en évidence les travaux de Nicholson (1981) et de Lamb (1985) sur les précipitations, ceux d'Olivry (1987) sur les précipitations et les écoulements en Sénégal, et de Mahé (1987) sur les apports hydriques au Golfe de Guinée.

Cette baisse pluviométrique que connaît l'espace climatique tropical se caractérise aussi par des phases successives ou alternatives d'excédents et de déficits hydriques. Elle se manifeste par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires. Allant dans le même sens, Mahé & Olivry (1995), Mahé *et al.*, (2000), Lebel et Vischel (2005), affirment que l'Afrique de l'ouest est frappé au cours de ces dernières décennies par une variabilité climatique qui se traduit par des sécheresses plus ou moins sévère selon que le climat est de type aride, semi-aride et soudanais. Plusieurs études et analyses ont montré que l'Afrique de l'Ouest a enregistré une forte variabilité du régime pluviométrique au cours de la seconde moitié du 20ème siècle (Nicholson et Palao, 1993; Janicot *et al.*, 1996; Servat *et al.*, 1998; Le Barbé *et al.*, 2002; Ali et Lebel, 2009). D'autres études sur la variabilité et les fluctuations climatiques en relation avec le développement et l'environnement ont été menées par plusieurs auteurs dont Motha *et al.*, (1980) ; Fontaine(1981); Janicot (1985), Boko(1988), Samba kimbata (1991), Bakam (1996), Bigot *et al.*, (1998), Houndénou (1999), Ndjendolé (2001), Philippon (2002) ,Sighomnou (2004) et Brou (2005).

Cette variabilité pluviométrique est caractérisée au cours des quatre dernières décennies par une succession de saisons des pluies avec un cumul annuel des précipitations moins important que la moyenne annuelle des deux décennies 1950 et 1960 (déficit annuel supérieur à 20%) (Servat *et al.*, 1997; Ali et Lebel, 2009; Mahé et Paturel, 2009).

La variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest à l'échelle pluriannuelle est caractérisée par la forte baisse des précipitations constatée depuis les décennies 70. Dai (2004), affirme que cette baisse des précipitations dans le Sahel est connue dans les publications sous l'appellation de sécheresse. Avant Dai, d'autres auteurs avaient démontré que la variabilité la plus connue tant par son ampleur, sa durée, que par son impact négatif sur les populations, est la forte baisse à l'échelle pluri

décennale communément appelée la sécheresse au Sahel (Charney, 1975 ; Folland *et al.*, 1986 ; Giannini *et al.*, 2003). En outre; (Janicot *et al.*, 1993), affirment que cette forte et durable péjoration des précipitations que l'on situe en moyenne de 1970 à 1990, va au-delà du Sahel et affecte toute l'Afrique de l'Ouest.

Les causes de cette variabilité sont nombreuses selon les auteurs, ainsi le premier rapport du GIEC sur le changement climatique attribue cette situation à une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère avec l'utilisation des sources d'énergie fossile (Easterling *et al.*, 1997). Une série d'études menées dans le cadre du programme ICCARE au sein du projet FRIEND AOC a montré que les régions non sahéliennes d'Afrique de l'ouest et centrale avaient subi depuis vingt-cinq ans environ une importante fluctuation climatique (Servat *et al.*, 1996; Paturel *et al.*, 1997). Elle se traduit, comme dans les régions sahéliennes situées plus au nord, par une baisse notable de la pluviométrie annuelle. Cette diminution des précipitations correspond à des ruptures dans les séries chronologiques de hauteurs annuelles précipitées. Un ensemble de méthodes statistiques a permis de les localiser à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Depuis cette date et sur l'ensemble des régions dites "humides" d'Afrique de l'ouest et centrale, on constate des déficits pluviométriques annuels pouvant atteindre 20-25 %. Bon nombre de zones de savane sont également passées d'un régime pluviométrique "guinéen" à un régime "soudanien" moins humide.

La variabilité climatique observée a d'énormes impacts sur les ressources en eau et l'environnement. C'est ainsi que Roche *et al.*, (2004) ; ont démontré que parmi les études menées sur les écosystèmes maliens, plusieurs ont mis en évidence les changements climatiques (Jean,1985 ; Lezine ,1989; Maley,1983 ; Nasi ,1994). Elles soulignent le caractère spatio-temporel de ce phénomène ; d'où la nécessité d'une évaluation continue de ce processus.

Dans le même ordre d'idée, les recherches effectuées au Bénin par Boko (1988), Afouda (1990), et Houndénou (1999), ont montré que la baisse de la pluviométrie associée à l'augmentation de la température ont induit une dégradation du milieu écologique et se sont soldées par des impacts négatifs sur la production agricole. Les perturbations et les déficits pluviométriques saisonniers enregistrés perturbent les cycles culturels et bouleversent les calendriers agricoles paysans en vigueur

chez les populations paysannes (Houndénou, 1999 ; Ogouwalé, 2001). Dans les différentes régions du Bénin, la vulnérabilité se manifeste par une détérioration des rendements et des pertes importantes de récoltes (Boko, 1988 ; Issa, 1995). Cette situation est due à l'indigence pluviométrique (Afouda, 1990), à la réduction de la durée des saisons agricoles (Issa, 1995), au réchauffement thermique et à la péjoration pluviométrique (Ogouwalé, 2004) : indicateurs des changements climatiques.

Mieux, Ogouwalé (2006) écrit que les changements climatiques qui s'annoncent, risquent d'affecter durement le développement agricole du Bénin, à moins que des stratégies d'adaptation et de mitigation conséquentes soient développées. En effet, ces résultats montrent une hausse des températures à venir comprise globalement entre 1 et 2,5°C en 2050. En se basant sur les références de 1961 à 1992, il estime que ces températures augmenteront de 1,8°C (Juillet et Novembre) à 2,5°C (Avril) dans le Bénin méridional. Au même moment, le recul de la pluviométrie serait compris entre 3 et 11 %. A l'exemple du mois d'Octobre qui connaîtrait un accroissement de 25,7 % de sa pluviométrie par rapport à sa normale 1961-1990, les mois précédemment moins pluvieux le deviendraient davantage. Cette situation ne serait pas sans effet sur la production agricole, dont les rendements baisseraient de 4,9 à 29,9 % exceptée la tomate qui serait moins vulnérable. Dans un tel contexte et vu que la population continuera de croître, 63, 61 et 73 % des populations seront affectées par l'insécurité alimentaire. Aux stratégies réactives existantes, il préconise le renforcement des structures de recherche, l'amélioration de la fertilité et des techniques d'utilisation des terres, la culture attelée et la mécanisation légère, l'amélioration des systèmes de conservation et de transformation des produits, le renforcement du dispositif de stockage et de commercialisation, la formation et le renforcement de la solidarité etc.

Vissin (2007), a montré sur les ressources en eau, l'influence de la variabilité climatique sur les écoulements du bassin versant béninois du fleuve Niger. Pour l'auteur, les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont amplifié la baisse des écoulements dans toutes les rivières (Mékrou, Alibori, Sota) du bassin versant béninois du fleuve Niger. Les baisses de l'écoulement sont cinq ou six fois plus sévères que celle de la pluie. On observe une forte liaison entre écoulement et recharge des sous-bassins versants situés sur les grès, ce qui n'est pas le cas des autres sous-bassins versants situés presque entièrement sur des formations de

socle. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant semble donc être aussi étroitement lié aux deux types de formations géologiques drainées par ces cours d'eau : le socle et les grès. Contrairement aux régions subsahariennes, les écoulements ont augmenté dans le Sahel. Mahé et *al* (2010) affirment que les études hydrologiques menées depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortement augmenté sur certains hydrosystèmes du Sahel, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale depuis 1970. Ces nouvelles conditions de ruissellement apparaissent plus favorables dans les zones caractérisées par une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées.

Outre ces impacts, Il apparaît de plus en plus clairement que certains systèmes sociaux et économiques ont subi les effets de l'accroissement récent de la fréquence des inondations et des sécheresses dans certaines zones.

Devant l'ampleur croissante du risque hydrométéorologique, les scientifiques, les politiques et les gestionnaires en ont fait une priorité. Le grand nombre de travaux réalisés au cours de ces dernières années en témoigne.

1- 4.2. Risques hydroclimatiques liés aux phénomènes extrêmes

La variation climatique et ses conséquences sur les systèmes biologiques et les sociétés humaines posent aujourd'hui de sérieux problèmes de sécurité, particulièrement en Afrique, qui constitue le plus vulnérable des continents de la planète aux impacts des changements climatiques en raison des défis politiques, socio-économiques et démographiques auxquels elle fait face

Le GIEC(2007), estime très vraisemblable (90 à 95 % de probabilité) que les chaleurs extrêmes et les événements de fortes précipitations continueront à devenir plus fréquents, plus intenses et surtout de plus en plus variables d'une année à l'autre (Pomerleau ; 2009). Ces mêmes constats ont été faits par DIOP (2010) pour qui, les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes vont conditionner la vulnérabilité à l'égard des phénomènes extrêmes futurs en modifiant les écosystèmes. De même, Katz et Brown (1992), Beniston et *al.*, (2007) évoquent l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les sécheresses, les inondations et les pluies très intenses. En Afrique de l'ouest, selon les différentes études réalisées particulièrement dans le cadre du PANA, parmi les principaux

risques liés aux phénomènes extrêmes d'origine hydrométéorologique figurent en bonne place la sécheresse et les inondations.

Selon Madiodio (2007), les scénarios d'évolution du climat en Afrique de l'ouest indiquent que la variabilité climatique que nous connaissons actuellement va s'amplifier et s'intensifier. Sécheresses et inondations vont non seulement devenir plus fréquentes mais aussi de plus grande ampleur. Avant lui, Joubert et Hewitson (1997) avaient écrit qu'il est prévu une accélération de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes en Afrique. Selon ces auteurs, cette situation est due au phénomène " El Nino " en Afrique orientale et méridionale. Elle entraînera la rareté des ressources en eau, l'accroissement de la désertification, la perte de la biodiversité due à l'augmentation de l'aridité et à la détérioration des écosystèmes, vont considérablement affecter les conditions de vie des populations, fortement dépendantes des ressources naturelles existantes.

De nombreuses études récentes (Groisman et *al.*, 2005 ; Webster et *al.*, 2005 ; Alexander et *al.*, 2006) constatent que l'évolution du climat au cours des cinquante dernières années, marquée par un réchauffement exceptionnel a été accompagnée par des changements dans différents types de phénomènes extrêmes. Les changements principaux sont: (i) une augmentation du nombre de vagues de chaleur et des nuits chaudes ; (ii) une augmentation de l'étendue des régions affectées par des sécheresses et des inondations; (iii) une augmentation du nombre d'événements de précipitations intenses aux latitudes moyennes.

Depuis quelques années, plusieurs études ont porté sur les changements planétaires, dont certaines se sont attardées sur les sécheresses (Wilhite et Glantz ; Kogan et Sullivan; Kogan; Park et *al.*, Jang cité par Beaudin, 2007). L'Organisation météorologique mondiale (OMM), révèle que de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes (Beaudin, 2007). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson et *al.*, 1997). L'augmentation de la population humaine entraîne une pression accrue sur l'environnement qui y contribue grandement. Dans plusieurs régions du globe, une pratique agricole non adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinée à la surexploitation des réserves hydriques accélère le processus des sécheresses et entraîne parfois une situation irréversible, la désertification (ONU, 1997; UNCCD, 2004).

Les auteurs comme Mahé et Olivry, (1995) ; Mahé et *al.*, (2000) ; Lebel et Vischel, (2005) affirment que cette sécheresse en cours depuis le début des années 70 semble être la conséquence d'une forte variabilité climatique liée à une perturbation probable de la mousson ouest africaine (Bricquet et *al.*, 1996 ; Savané et *al.*, 2001 ; Goula et *al.*, 2006 ; Kouakou et *al.*, 2007). D'autres études ont situé l'apparition de ce phénomène vers la fin de la décennie 60 et au début de la décennie 70 (Hubert et Carbonnel, 1987; Sircoulon, 1987; Hubert et *al.*, 1989; Démarrée, 1990). Au sud, dans des régions au climat plus humide, il semble que ce phénomène soit également ressenti (Sutcliffe et Knott, 1987; Nicholson et al, 1988; Mahé et Olivry, 1991; Olivry et *al.*, 1993). Ce sentiment est partagé par la population des pays riverains du Golfe de Guinée qui appartient, avec d'autres, à ce que l'on appelle communément "l'Afrique humide". Il peut donc sembler paradoxal de parler de "sécheresse" car les conséquences d'un tel phénomène y sont moins sévères et moins dommageables.

La situation de sécheresse continue à placer la région au cœur du débat scientifique sur la recherche d'une meilleure connaissance des interactions entre le sol et l'atmosphère à travers le cycle de l'eau (Landsberg, 1975; Charney et *al.*, 1977; Dolman et *al.*, 1997; Nicholson, 2000; Ramel, 2005; Besson, 2009). Cet intérêt (Paturel, Ouedraogo, Servat, Mahé, Dezetter et Boyer, 2003) des experts du climat et des processus de surface sur la caractérisation du mécanisme climatique de la sous-région s'expliquent par trois principales raisons :

- une variabilité pluviométrique unique à la surface du globe caractérisée par un déficit pluviométrique répété depuis la fin des années 1960 (Lebel et Ali, 2009a; Mahé et Paturel, 2009) et marquée par deux périodes de sécheresse sévère, 1972-1973 et 1983-1984 (Moron,; Nicholson,; Dai, Lamb, Trenberth, Hulme, Jones et Xie cité par Ibrahim 2012) ;
- les conséquences dramatiques de la baisse de la pluviométrie sur la vie de la population et de l'environnement (Nicholson, Balme-Debionne, Niasse et *al.*, Sivakumar, Kandji et *al.*, cité par Ibrahim ; 2012) ;
- le rôle de la bande sahélienne dans le bilan global de l'énergie (l'augmentation de l'albédo dans la zone suite à la dégradation du couvert végétal peut avoir des répercussions sur le climat des autres régions) (Charney et *al.*, 1977; Laval, 1986; Paeth et Hense, 2004).

Outre les épisodes de sécheresse, l'inondation est un risque hydrométéorologique qui constitue une menace pour les communautés. Selon le Rapport du Groupe de

travail II du GIEC (2007), les inondations pourraient augmenter d'ampleur et de fréquence dans beaucoup de régions du fait de la fréquence accrue des épisodes de fortes précipitations qui peuvent accroître l'écoulement dans la plupart des zones et faciliter la recharge des nappes souterraines dans certaines plaines inondables.

Berz (2000) affirme que les inondations sont au rang de premier risque naturel dans le monde, et allant dans le même sens, Wahiba (2012) montre que les crues et les inondations sont considérées comme les formes de risque naturel les plus répandues et les plus dévastatrices dans le monde. L'importance des dommages causés par les inondations est principalement imputable à une urbanisation et une industrialisation passées en plaine d'inondation, qu'ils ont eu pour conséquence une augmentation de la vulnérabilité des biens et des personnes (Torterotot, 1993). Les enjeux très importants liés aux inondations expliquent les efforts qui sont aujourd'hui mis en œuvre pour analyser et comprendre ce phénomène, afin de réduire le risque. Selon Ago., et *al.*, 2005 ; Amoussou. et *al.*, 2008 ; Hountondji et Ozer ., 2010, imputent la responsabilité des inondations au sud au recul de la grande saison des pluies ainsi qu'aux précipitations accrues en août et à l'élévation des températures. Les populations seront exposées aux risques hydroclimatiques qui s'intensifieront au cours des prochaines années selon le GIEC (2007). De même, en dépit des tendances à la baisse des précipitations ces dernières décennies dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou, Donou (2007) a montré que la forte fréquence des événements pluviométriques extrêmes est responsable de l'avènement des crues. Les eaux de ces dernières inondent la plaine alluviale provoquant ainsi, des dégâts environnementaux et socio-économiques.

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. Cette idée est confirmée par André (2007) qui 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 où les risques paraissent plus sérieux : catastrophes naturelles plus brutales, faisant en un court laps de temps des dizaines de milliers de victimes ; désertifications entraînant des famines récurrentes.

Par ailleurs, Cazenave (2006) montre qu'il est nécessaire de s'inquiéter davantage de la récurrence d'événements climatiques extrêmes (précipitations intenses et inondations) que de la hausse du niveau de la mer dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. Pour l'auteur, les plaines inondables ont été propices à l'établissement de populations humaines et au développement des activités économiques étant donné que la présence de cours d'eau garantit des sols fertiles, un approvisionnement en eau et des moyens de transport. Les dégâts occasionnés par les crues et les inondations constituent les problèmes les plus graves pour la production agricole et la sécurité des populations installées dans ces plaines inondables.

1-4.3. Stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques

Au vu des conditions de vie précaires des populations en Afrique, du fait de la vulnérabilité de leurs moyens et modes d'existence, l'Afrique risque d'être particulièrement affectés par les impacts des variations climatiques. Cette vulnérabilité s'explique notamment par le faible accès aux ressources, à l'information et à la technologie. Dans ces circonstances, les changements climatiques risquent de poser des défis majeurs qui s'ajouteront aux problématiques actuelles, pouvant ainsi profondément éroder les capacités de gestion des gouvernements en place selon Pomerleau (2009). Pour prévenir cette situation, le Forum pour le Partenariat avec l'Afrique Unité de Soutien (2007) estime que les pays africains devront mettre en œuvre des stratégies leur permettant de s'adapter aux conséquences du changement climatique. Ils doivent intégrer ces stratégies dans leurs politiques de développement et dans les décisions prises en termes d'investissements publics. C'est dans ce cadre que l'Union africaine, la Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique (CENUA) et le Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC) ont pris des mesures en lançant le plan d'action ClimDev Afrique dont l'objectif est d'intégrer des informations météorologiques dans les processus politiques de prise de décisions. Selon Pomerleau (2009), malgré les impacts probables des risques liés aux variabilités climatiques en Afrique, peu d'actions ont été entreprises à ce jour par la communauté internationale et les gouvernements africains pour gérer explicitement ce risque, qui semble inexistant dans les stratégies continentales et nationales de prévention des conflits. Pour l'auteur, les acteurs impliqués dans la réduction des impacts liés aux risques hydroclimatiques ont plutôt

tenté de réduire la vulnérabilité de l'Afrique par la mise en œuvre de programmes d'adaptation qui visent à améliorer les capacités des populations à s'adapter aux changements climatiques de façon à minimiser les impacts sur leurs modes de vie. L'objectif ultime des processus d'adaptation est en fait d'assurer la sécurité des populations face aux menaces grandissantes émanant des changements des conditions climatiques dans lesquelles elles vivent (Institut international du développement durable, 2003). Il apparaît ainsi que les politiques et programmes d'adaptation, s'ils sont efficacement mis en œuvre, et cela à de multiples échelles, seraient un moyen possible d'éviter que les répercussions des changements climatiques se muent en déclencheurs de conflits (Brown et Crawford, 2009).

Les études sur les stratégies d'adaptation à la vulnérabilité des risques hydroclimatiques réalisées en Afrique de l'ouest et au Bénin en particulier, restent globales et tendent à gommer les particularités locales. Pour pallier ce phénomène, la présente étude se propose d'étudier les risques hydroclimatiques et la vulnérabilité des écosystèmes à l'échelle du bassin versant de la Sota.

1-5. Clarification des concepts

L'utilisation récurrente de certains concepts centraux dans cette étude, et dont les acceptions ont fait l'objet de plusieurs points de vue de chercheurs, oblige à les cadrer afin de contextualiser la compréhension des idées développées.

L'aléa constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (Perretti-Watel, 2001). Selon Gendreau cité par Wahiba (2012), l'aléa « *est une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence* » De même, BETURE CEREC, (2002), définit l'aléa d'un phénomène naturel en un lieu donné comme la probabilité de manifestation d'un événement d'intensité donnée. Dans une telle approche, la notion d'aléa est donc la conjugaison de deux facteurs que sont l'intensité du phénomène et sa fréquence. (Veyret, 2001) définit par exemple l'aléa naturel comme « un processus physique lié à la dynamique terrestre. La géographie des risques naturels accorde au terme « aléa » une définition un peu particulière, plus restreinte que le sens original. Ainsi dans le domaine de la géographie des risques, l'aléa n'est pris en compte qu'en tant

que facteur potentiel de dommages. Pour Veyret (1997), l'aléa est « le phénomène qui engendre une menace potentielle pour les personnes, les biens dans un secteur donné et pour un temps donné » Dauphiné (2001) propose d'assimiler l'aléa à une probabilité d'occurrence complétée par une dimension spatio-temporelle. Classiquement, l'aléa est déterminé selon trois critères : « une magnitude (composante énergétique), une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale) » (Beck cité Texier, 2009).

Abordant dans le même sens, Hostache, (2010) affirme que l'aléa est un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité données qui peut être caractérisé suivant deux composantes, l'une fréquentielle (occurrence), l'autre spatio-temporelle (intensité) car tout comme la période de retour d'un événement hydrométéorologique, la période de retour d'un événement hydrologique n'a de sens que dans un contexte spatio-temporel bien défini en dehors duquel cette valeur n'a plus de sens. Mais à ces deux paramètres, Beck cité par Peltier, (2012), a ajouté un troisième paramètre qui est la composante spatiale. Dans la présente étude, le concept de l'aléa retenu est celui utilisé par (Wahiba, 2012); qui définit l'aléa comme étant le produit d'une réaction combinée entre l'aléa météorologique et l'aléa hydrographique qu'il a appelé « aléa hydrométéorologique » par commodité.

Aléa hydrométéorologique : un phénomène de nature atmosphérique, hydrologique ou océanographique susceptible de provoquer des pertes en vies humaines, des blessures ou autres impacts sur la santé, des dégâts matériels, la perte des moyens de subsistance et des services, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation environnementale (UNISDR, 2009). La définition de l'aléa retenue dans la présente étude inspirée de KREISS (2004) est un événement hydrométéorologique doté d'une fréquence et ayant une probabilité d'occurrence.

Variabilité pluviométrique : définie par plusieurs auteurs dont Boko (1988) cité par Beltrando (1995) et Brou (2005). C'est l'un des éléments intégrateurs de la variabilité climatique, Elle fait pressentir la mobilité ou la variation du schéma pluviométrique moyen et l'accentuation des valeurs extrêmes à toutes les échelles temporelles et spatiales. Autant que possible, elle est analysée par rapport aux valeurs centrales ou médianes des séries plutôt que par rapport aux valeurs moyennes ou normales, qui

sous-entendent l'idée de fixité du climat. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique ou à des variations du forçage externe anthropique.

La vulnérabilité : le terme de vulnérabilité peut avoir plusieurs sens. Il n'existe donc pas une définition standard du concept vulnérabilité dans la littérature scientifique (Kelly et Adger, 2000, Dolan et Walker, 2003). C'est un concept qui englobe un grand nombre de définitions (O'Brien et *al.*, 2007), mais qui s'avère pour la plupart du temps, demander une approche très globale (Sullivan et Meigh, 2006). Cutter (1996), le définit comme une formulation rhétorique permettant d'avertir d'un danger et des pertes qui pourraient l'accompagner. Par contre, Watson et *al.*, (1996) ; Klein et Nicholls (1999) la définissent comme la capacité d'un système à répondre aux contraintes et aux chocs qu'il subit. En effet, Kasperson et Kasperson (2005) passent en revue les différentes définitions de la vulnérabilité et concluent qu'il n'y a pas de conceptualisation unique de la vulnérabilité qui pourrait s'adapter à tous les contextes et à des fins d'évaluation. Le choix de la définition peut dépendre de son aptitude à une vulnérabilité particulière et de son interprétation de la politique ou de l'action (Downing et *al.*; 2005). Pour Blaikie et *al.*, (1994), on entend par vulnérabilité, les caractéristiques d'une personne ou d'un groupe en fonction de leur capacité à anticiper, à faire face, et à résister de se remettre de l'impact d'un aléa naturel. Elle est fonction du caractère, de l'ampleur et du rythme des variations climatiques auxquels un système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (McCarthy et *al.*, 2001). Pour Smit and Wandel cité par UNFCCC, (2007), la vulnérabilité dépend de deux facteurs clés. Le premier est le degré d'exposition au risque climatique et la seconde porte sur le degré de sensibilité au risque. Par contre le GIEC reconnaît la vulnérabilité en fonction de trois éléments: l'exposition et la sensibilité d'un système à des conditions dangereuses et la capacité ou la capacité du système à faire face, s'adapter ou se remettre des effets de ces conditions. C'est un concept relatif, qui décrit la nature, l'importance des enjeux exposés à un aléa, les ressources disponibles pour y faire face et les impacts qui en résultent. (Torterotot, 1993).

La définition de la vulnérabilité retenue dans cette étude est celle recommandée par le GIEC dans le cadre des études se rapportant aux variations climatiques et aux risques naturels qui la définit comme le degré auquel un système est susceptible, ou

se révèle incapable de faire face aux effets néfastes des changements climatiques, notamment à la variabilité du climat et aux conditions climatiques extrêmes. (Downing et *al.*, 2002 Adger et *al.*, 2004).

Cette vulnérabilité est analysée sous deux approches différentes : l'approche d'analyse de la vulnérabilité biophysique et celle de la vulnérabilité sociale. L'approche de la vulnérabilité biophysique discerne la vulnérabilité en matière de quantité de dommages potentiels causés à un système biophysique par un événement climatique nuisible (Brooks, cité par Yamasaki; 2012) tandis que l'approche de la vulnérabilité sociale la perçoit comme un état qui existe au sein d'un système avant qu'il ne rencontre un événement nuisible (Brooks, 2003). Dans cette formulation, la vulnérabilité est un fait qui existe au sein des systèmes, indépendamment des aléas extérieurs. En résumé, la vulnérabilité biophysique est centrée sur les impacts, tandis que le concept de vulnérabilité socio-économique met l'accent sur la vulnérabilité intrinsèque des communautés.

Ecosystème est un milieu naturel composé d'êtres vivants en constante interaction entre eux mais également avec l'eau, l'air et le sol. Ce jeu d'interdépendance forme cet ensemble cohérent et fonctionnel (CASDAR, 2011). Dans la présente étude, l'écosystème est perçu comme l'espace cultivé, créé et géré par l'homme pour la production agricole. C'est donc une association dynamique comprenant les cultures, les pâturages, le bétail, d'autres espèces de flore et de faune, l'atmosphère, les sols et l'eau en interaction avec les usages qu'en font les hommes sur la base de leurs systèmes de valeurs et traditions. Les spécialistes l'appellent agro-écosystème et le définissent comme un produit de la modification de l'écosystème par l'homme et constitue un espace d'interaction entre l'homme, ses savoirs et ses pratiques et la diversité des ressources naturelles (UNESCO, 2009).

La vulnérabilité d'un écosystème : se définit comme son incapacité à faire face à une perturbation ou à un stress (White cité par Limousin, 2009). Elle dépend de sa résistance à la perturbation ou au stress, de sa résilience, de sa capacité à retrouver son état initial après la perturbation ou le stress (Luers cité par Limousin, 2009).

En milieu rural, la vulnérabilité écologique induite par les variations climatiques constitue un amplificateur des effets d'autres types de vulnérabilité économique (faible accès aux ressources, aux marchés, etc.), sociale (exclusion sociale, faible

accès à l'éducation, à la santé), etc. C'est pourquoi, dans le cadre de l'analyse des stratégies locales d'adaptation, il est particulièrement important de prêter attention aussi bien aux pratiques locales qui permettent de réduire la vulnérabilité des populations qu'à celles qui l'aggravent.

Extrême climatique (phénomène météorologique ou climatique extrême): est le fait qu'une variable météorologique ou climatique prend une valeur très éloignée de sa valeur moyenne. Par souci de simplicité, cette expression est utilisée pour désigner les phénomènes extrêmes à la fois météorologiques et climatiques (GIEC ; 2012). Pour Diop (2010), on parle d'extrême climatique lorsqu'une variable météorologique ou climatique qui prend une valeur située au-dessus (ou dessous) d'un seuil proche de la limite supérieure (ou inférieure) de la plage des valeurs observées pour cette variable.

La capacité d'adaptation d'un système : est la «capacité de ce système à s'adapter aux changements climatiques (notamment à la variabilité du climat et aux phénomènes extrêmes), afin d'atténuer les dommages potentiels, de tirer parti des possibilités offertes ou de faire face aux conséquences» (UNFCCC, 1992; GIEC, 2007).

La capacité d'adaptation inclut tout ce qui permet à la collectivité de s'adapter à un changement qui survient dans une situation donnée. C'est une notion dynamique qui évolue dans le temps, en fonction des ressources dont dispose la communauté et également de son expérience passée en matière d'adaptation. Elle découle des facteurs qui facilitent l'anticipation des impacts et l'ajustement aux nouvelles conditions.

Pour les systèmes humains, l'adaptation est la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences, de manière à en atténuer les effets préjudiciables et à en exploiter les effets bénéfiques. La capacité d'adaptation d'une communauté peut ainsi être mesurée à travers les outils dont elle dispose pour changer une situation indésirable ou pour profiter des impacts positifs provoqués par une variation du climat. Par exemple, l'existence d'un système d'alerte précoce, la connaissance des secteurs sociaux et économiques les plus vulnérables, la possibilité de mobiliser des ressources financières et humaines, l'existence d'une stratégie ou d'un plan d'adaptation, la prise en compte des impacts probables des

changements climatiques dans la planification stratégique de la communauté, l'information du public, etc.

On distingue plusieurs types d'adaptation ; chaque type dépendant des stratégies et des moyens dont disposent les populations. L'adaptation, qu'elle soit anticipative (c'est à dire prise avant que les impacts initiaux aient lieu) ou réactive (c'est à dire conçue et mise en œuvre en réponse aux impacts initiaux) permet de réduire la vulnérabilité à la variabilité et au changement climatiques. Selon le dernier rapport du GIEC (2007), à ces deux principaux types d'adaptation, s'ajoute l'adaptation planifiée, résultat d'une décision politique délibérée, basée sur une prise de conscience des changements en cours et à venir. Ainsi, une bonne évaluation de l'adaptation selon des critères pertinents (disponibilité, bénéfiques, coûts, efficacité, efficience et faisabilité) s'impose.

Le concept de **résilience** : renvoie à la capacité d'une personne ou d'un système à surmonter les chocs ou stress causés par des phénomènes climatiques et à pouvoir ainsi retrouver son état initial (GIEC, 2007). Mais dans une perspective de développement durable, les stratégies locales d'adaptation ne doivent pas avoir pour seule ambition de retourner à l'état dans lequel se trouvait le système avant le choc. Elles doivent plutôt viser des objectifs de transformation qui consistent à mettre en place des systèmes plus durables. Comme exemple : un ménage rural fait face à une baisse de ses revenus agricoles du fait d'une chute de rendements consécutifs à la baisse de la pluviométrie. Pour maintenir son niveau de vie, il peut mettre en place différentes options, à savoir changer de spéculations, garder les mêmes spéculations en adoptant de nouvelles variétés de semences, augmenter les superficies à cultiver, diversifier ses activités. Certaines options procurent des réponses durables tandis que d'autres peuvent à terme augmenter la vulnérabilité du ménage. C'est pourquoi dans le panier des solutions, il est important de savoir choisir celles qui contribuent à renforcer durablement la capacité de résilience.

La mitigation: renvoie à l'ensemble des mesures qui visent à s'attaquer aux causes des changements climatiques. Elles concernent par exemple toutes les actions qui visent à limiter les émissions de gaz à effets de serre (GES), principaux responsables du réchauffement climatique et des perturbations qu'ils induisent sur le cycle des pluies, le niveau de la mer, etc. A titre d'illustration, l'utilisation des

énergies fossiles dans l'industrie ou l'agriculture ainsi que la déforestation, sont des causes majeures de réchauffement climatique. S'attaquer à ces phénomènes participe aux stratégies de mitigation (GIEC, 2007).

L'adaptation : C'est un processus d'ajustement des systèmes naturels et humains à un stimulus climatique constaté ou anticipé, à ses effets et ses impacts. Il désigne un changement de procédures, de pratiques et de structures visant à limiter ou supprimer les dommages potentiels ou à tirer bénéfice des opportunités créées par les changements climatiques. Il induit des ajustements afin de réduire la vulnérabilité au changement climatique de certaines communautés, régions ou activités/secteurs (UNISDR, 2009 ; Fall, et *al.*, 2011). La définition retenue ici est celle de la FAO (2011) selon laquelle l'adaptation est l'ajustement dans les systèmes naturels ou humains en réponse à des changements climatiques actuels ou attendus, qui atténuent les dommages ou en valorisent les bénéfices.

L'adaptation aux variabilités hydroclimatiques : est définie comme l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques (IPCC, 2001). La manière dont les systèmes s'ajustent dépend de la nature, de la sévérité du choc, du degré d'exposition, de sensibilité au choc et des moyens dont disposent les systèmes pour faire face.

Il apparaît ainsi que les mesures de mitigation et celles d'adaptation se complètent ; les premières s'attaquant aux causes profondes des changements climatiques, les secondes aux effets des changements climatiques sur l'environnement et les modes de vie. La capacité d'adaptation renvoie aux possibilités dont dispose un système humain ou naturel à concevoir et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques afin d'évaluer les effets. En milieu rural africain, cette capacité dépend de la disponibilité, de l'accès et des possibilités de valorisation du capital humain (main d'œuvre, connaissances et savoirs intellectuels, etc.), du capital social (réseaux, formes de solidarité, règles communautaires, etc.), du capital naturel (ressources naturelles dont les ressources en terre et en eau, ressources forestières, fauniques, etc.), du capital technique (équipement, innovations techniques locales, etc.) et du capital financier (ressources financières, revenus, etc.). Cette capacité varie d'une communauté à l'autre et d'une période à l'autre.

L'**inondation** : submersion rapide ou lente, d'une zone habituellement hors de l'eau.

Le risque inondation est la conséquence de deux composantes :

L'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement ou apparaître (aléa) ;

L'homme qui s'installe dans la zone inondable pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités (enjeu) (Ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004).

Le risque: selon Dervaux (1983), le mot risque vient de l'italien *risco* qui signifiait dans le domaine maritime « danger lié à une entreprise » et « la chance ou la malchance d'un soldat » dans le domaine militaire au XVI^{ème} siècle. L'apparition du concept du risque est liée, selon Glatron (2003) et Veyret (2004) à la naissance du système d'assurance vers la fin du XIV^{ème} siècle. Mais de nos jours, le concept de risque peut avoir diverses définitions selon la discipline dans laquelle il est enseigné. En géographie, pour Bailly (1996) le risque est défini comme « un danger éventuel, plus ou moins prévisible, dans une aire non précisément définie et d'une durée indéterminée ». Mais Texier cité par Wahiba (2012) va plus loin et propose d'appréhender le risque « dans un cadre conceptuel d'analyse de la vulnérabilité globale, c'est-à-dire intégrant tous les facteurs (socio-économiques, politiques, culturels) formant un système de contraintes qui agit de manière différentielle sur un territoire, sur les comportements des populations menacées au quotidien. Et dans ce cas, l'aléa naturel devient alors un aléa parmi de nombreux autres ».

Au-delà des définitions disciplinaires, la définition la plus courante du risque reste celle qui considère le risque comme la résultante de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité (Oberlin *et al.*, 1993, Gilard et Gendreau, 1998, Ancy, 2005; Hostache *et al.*; 2006). En effet, d'après (Torterotot, 1993) : « Il s'il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé ». Même si il n'y a pas une définition universellement acceptée, tous les auteurs (ou presque) s'accordent à analyser le risque comme le résultat d'une relation (dont la dénomination varie) entre un aléa et la vulnérabilité d'une société (Peltier ; 2005). il est désormais courant de définir le risque comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité (Ancy, 2005; Gilard et Gendreau, 1998; Oberlin *et al.*, 1993). L'aléa représente un phénomène naturel aléatoire caractérisé par son amplitude et sa période de retour et la vulnérabilité transcrit quant à elle la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène

naturel c'est-à-dire l'ensemble des biens et des personnes pouvant être touchés par un phénomène naturel (Duclot, 2003). L'analyse du risque passe donc la caractérisation séparée de l'aléa et de la vulnérabilité.

Le risque de crue et d'inondation: selon Raclot (2003), à l'exception des phénomènes rares de rupture de digue ou de barrage, l'inondation est toujours le résultat de précipitations intenses (et ou de fonte de neige). Selon la nature du processus aboutissant à l'inondation (origine, dynamique temporelle et spatiale), il est classique de distinguer trois grands types de risque d'inondation (pluvial, fluvial et torrentiel), qui, dans la réalité, se retrouvent souvent combinés. Deux des trois types sont considérés dans la présente étude.

Le risque d'origine pluvial est le résultat d'un processus de ruissellement suite à des précipitations violentes sur des surfaces de faibles tailles ; il est généré par des phénomènes localisés dans l'espace et le temps. Si les zones exposées sont de faible extension, elles peuvent être malheureusement très peuplées. De plus, le temps de réaction à l'évènement est faible.

Le risque fluvial est le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau en plaine, généralement caractérisé par des montées lentes des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces de faibles pentes. Les zones exposées constituent généralement des secteurs de forte extension sur lesquels l'homme s'est implanté depuis longtemps.

Pour Lambert et Prunet (2000), le risque d'inondation peut être appréhendé comme « un phénomène dynamique et plus ou moins paroxysmique, limité dans le temps et dans l'espace, qui se traduit par la submersion sous des eaux de crue de tout ou partie de ce territoire que représente la plaine inondable (vallée alluviale fonctionnelle) ». Le passage de ces phénomènes laisse non seulement des empreintes sur le territoire et « griffe » l'espace géomorphologique mais marque aussi la mémoire de la population. Comme l'explique Lambert et Prunet (2000), « cette dynamique morphogénique actuelle fait de la plaine inondable un espace géographique particulier, lieu d'une dynamique qui conditionne le modèle, le passage de la plaine, mais aussi d'une interaction intense entre dynamique des crues inondantes et activités socio-économiques fortes ». Et c'est bien cette manière d'inscrire le risque de crue et d'inondation au sein du territoire qui fait du risque une problématique fondamentalement géographique.

L'évaluation des risques : est la méthodologie pour déterminer la nature et l'étendue des risques à travers une analyse des risques potentiels et l'évaluation des conditions existantes de la vulnérabilité qui, associées, pourrait affecter les populations, établissements, services, subsistance.

La gestion des risques : est une approche systémique et pratique managériale pour limiter les dommages et les pertes potentiels. Elle comprend l'évaluation des risques et leur analyse, ainsi que la mise en œuvre de stratégies et d'actions spécifiques pour les contrôler, les réduire et les transférer.

Les scénarios climatiques sont des visions à long termes de l'évolution du climat futur (c'est à dire des paramètres climatiques) ainsi que des principaux paramètres socio-économiques dans une localité donnée. Ils permettent d'estimer la vulnérabilité de la contrée et d'anticiper avec des mesures d'adaptation (AGRHYMET, 2010).

1-6. Cadre conceptuel de la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques

La figure 9 montre le schéma conceptuel de la vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota.

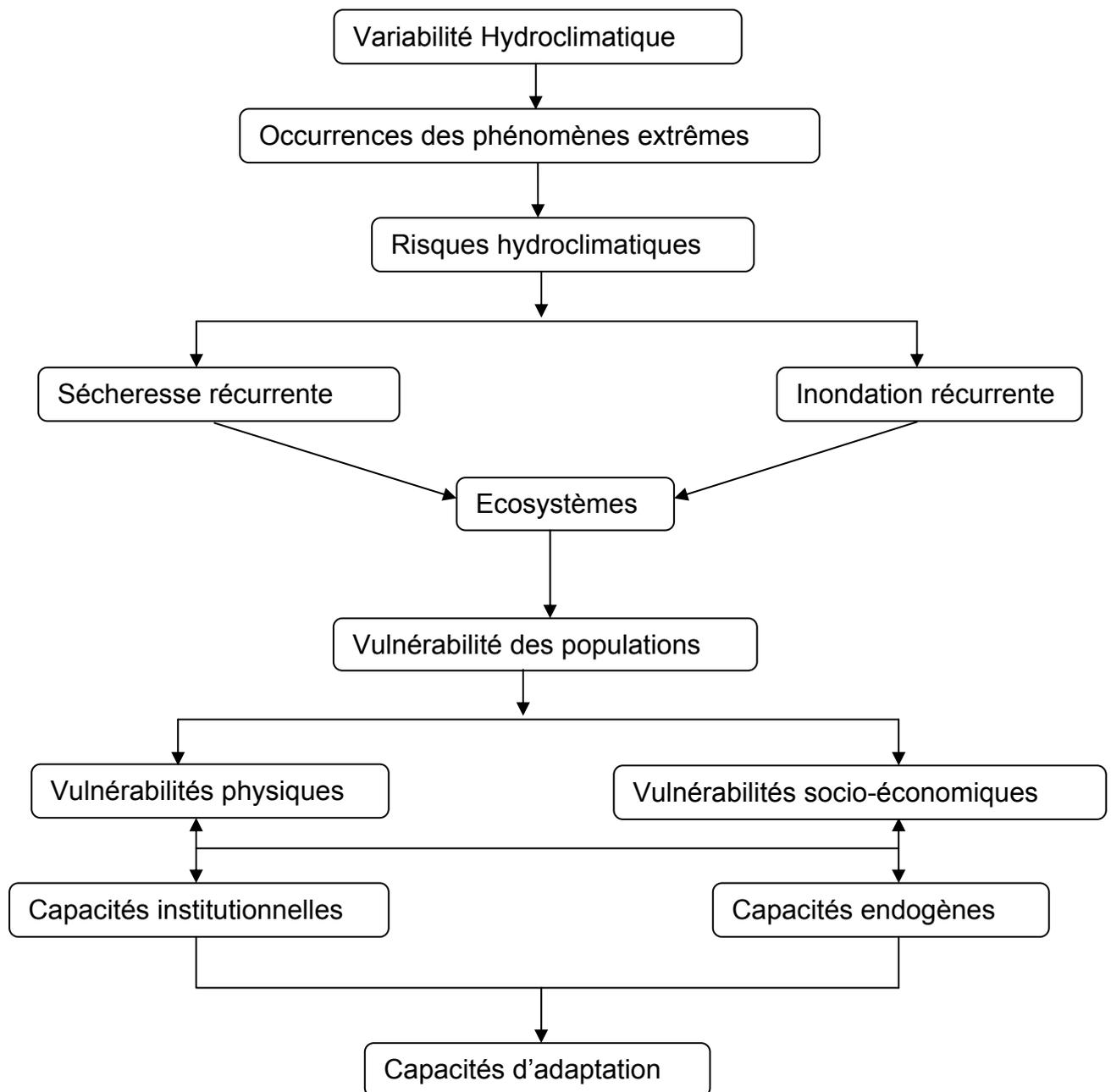


Figure 9: Schéma conceptuel de la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques

Source : adapté de Füssel et Klein (2002)

La variabilité climatique qu'a connue l'Afrique ces dernières années s'est traduite par l'occurrence d'évènements climatiques extrêmes (sécheresse, inondation) qui sont de plus en plus fréquents dans les régions subsahariennes depuis la fin des années 1960 (Houghton *et al.*, 2001; Gachon *et al.*, 2007). Le dernier rapport (GIEC, 2007) mentionne que ces phénomènes ont évolué de façon significative aux échelles globale, régionale et locale. La vulnérabilité des populations aux risques hydroclimatiques est liée d'une part à l'exposition du bassin versant et à la sensibilité

des activités économiques aux aléas naturels. La vulnérabilité physique analyse les dommages potentiels causés à un système physique par un événement climatique nuisible (Jones et Boer, 2003, dans Brooks, 2003) tandis que la vulnérabilité sociale la perçoit comme un état qui existe au sein d'un système avant qu'il ne rencontre un événement nuisible (Allen, 2003, dans Brooks, 2003). La capacité d'adaptation dépend aussi de la capacité individuelle et institutionnelle à faire face aux influences des risques hydroclimatiques.

En somme, à travers les caractéristiques physiques et humaines, les différents éléments du relief qui concourent à la vulnérabilité du bassin versant de la Sota à l'exutoire de malanville aux risques hydroclimatiques ont été présentés.

Ainsi deux formations géologiques prédominent dans le bassin versant: les formations du socle et des grès sédimentaires de Kandi. Sur ces formations, le réseau hydrographique est constitué d'un ensemble de cours d'eau temporaires et permanents dont le plus important est la rivière Sota. Les phénomènes pluviogènes liés à la circulation atmosphérique ont créé le climat tropical de type soudanien. Ces phénomènes pluviogènes ont mis en place plusieurs types de sols sur les différentes formations géologiques.

Sur ces sols se développent plusieurs activités dont l'agriculture est la principale. Les populations développent les cultures telles que le coton, le maïs, le riz, le sorgho, l'igname. L'économie du secteur d'étude est complétée par l'élevage qui se fait sous forme de transhumance nationale et transfrontalière. L'analyse des statistiques démographiques révèle une population en perpétuelle évolution.

CHAPITRE II:

APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Ce chapitre présente l'approche méthodologique à travers les données, les techniques de collecte, les outils de collecte, de traitement des données et les méthodes de calcul statistiques et d'investigation socio-économiques utilisées afin d'analyser la variabilité climatique et la vulnérabilité des populations dans le bassin versant de la Sota.

2-1. Nature et source des données utilisées

Les données collectées et utilisées dans cette étude concernent les données quantitatives et qualitatives de nature environnementale (climat, débit, et occupation du sol), de nature économique (production agricole, superficie des cultures, élevage) et de nature socio-institutionnelles (informations sur la gestion des risques et catastrophes). Les données couvrent des périodes variables selon leurs disponibilités.

2-1-1. Données climatologiques

Les séries de données climatologiques utilisées dans la présente étude ont été fournies par la Direction Nationale de la Météorologie du Bénin archivée à l'ASCENA. Le réseau d'observation météorologique utilisé est composé de six stations qui sont des simples postes pluviométriques, deux stations climatiques complètes et une station synoptique (figure 10).

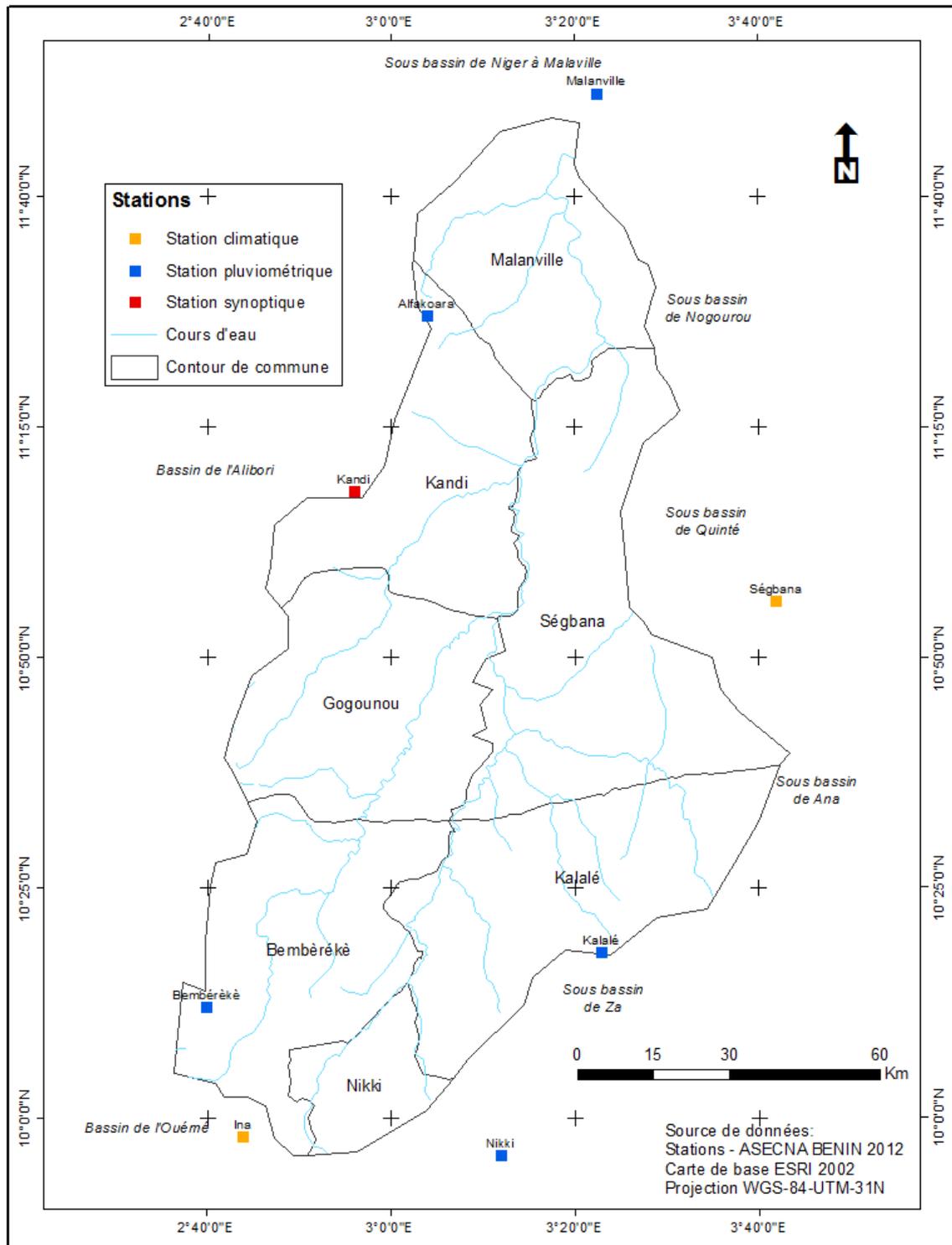


Figure 10: Répartition des stations dans le bassin versant de la Sota

De l'analyse de la figure 10 il ressort que les stations sont inégalement réparties dans le bassin versant et à son voisinage immédiat. Les données climatologiques qui ont fait l'objet d'analyse correspondent :

- aux hauteurs de pluies quotidiennes, mensuelles et annuelles de la période 1960 à 2010 ; ayant moins de lacunes possibles (moins de 5% de valeurs manquantes pour chacune des stations) ;
- les données d'ETP, de températures issues de la seule station synoptique de Kandi de la période 1960-2010 ;
- les données hydrologiques proviennent du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau (SH/DG-Eau). Elles sont constituées des débits journaliers et mensuels des stations de Coubéri et de Gbassé. Elles couvrent la période 1960-2010). Comme pour les données climatologiques, des lacunes ont été constatées sur les séries chronologiques des débits. Le choix de deux stations hydrométriques sur la Sota se justifie par le fait que chacune des stations enregistrent la dynamique hydrologique de deux formations géologiques différentes : Gbassé en amont sur les formations granito-gneissiques et Coubéri en aval sur les grès. Le tableau I, présente les coordonnées et la superficie couverte par les station hydrométrique de la Sota.

Tableau I: Coordonnées des stations hydrométriques de la Sota et leurs superficies

Station hydrométrique	Coordonnées		Superficie (Km ²)
	Latitude Nord	Longitude Est	
Couberi	11°45'	03°20'	13410
Gbassé	10°59'	03°15'	8300

Source : DGEau / SH, année 2011

2-1-2. Données environnementales

Dans le but de déterminer les zones les plus affectées par la dégradation de l'environnement suite à l'occurrence des phénomènes hydroclimatiques et à l'exploitation des terres au cours des dernières décennies, les données satellitales ont été utilisés, elles sont issues des images du capteur Landsat-7-TM, ETM+. Le radiomètre ETM+ offre des images couvrant un champ d'observation de 185 x 185 km, avec une résolution spatiale de 30 m en mode multi-spectral à l'échelle de 1/1000000^é des années 1978, 1998 et 2010 obtenues au CENATEL. Les domaines spectraux explorés concernent le visible (bleu, vert, rouge) De nombreux travaux d'études ont démontré l'utilité des sources d'information satellitales, notamment pour l'analyse de la biomasse et de l'occupation du sol (ex. Rousse *et al.*, 1973; Samson et Gérard, 1991; Dubois, 1993; Wolff, 1994; Baudouin *et al.*, 1995; Gonzalez, 2002).

- Le MNT ASTER V2, de résolution de 30 m (figure 10), extrait du modèle numérique de terrain global de l'Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace des Etats Unis (<http://www.gdem.aster.jp>). La carte des pentes, la carte de réseau hydrographique et la carte de densité de drainage ont été extraites du MNT puis combinées à d'autres cartes thématiques pour déterminer la vulnérabilité physique du bassin versant puis élaborer la carte de risque d'inondation.

2-1-3. Critique des données

La critique et le contrôle de la qualité des données sont des traitements qui doivent être effectués pour s'assurer de l'homogénéité et la fiabilité des séries climatologiques à utiliser dans une étude hydrologique donnée (Serhir, 2007). Ainsi, les données issues des fichiers de valeurs brutes de précipitations et de débits ont été soumises à une vérification systématique. Les erreurs aléatoires flagrantes dues à des fautes de frappe ou à la saisie des relevés ont été éliminées de la banque de données. Ceci a entraîné la suppression d'un certain nombre de valeurs très douteuses. Ces contrôles permettent d'éliminer, les valeurs manifestement fausses, mais ne garantissent pas la justesse des données conservées

Les données manquantes ont été reconstituées sur l'ensemble des stations retenues. Ce travail a permis de disposer de chroniques les plus complètes possibles, constituant la banque de données opérationnelle, utilisée ensuite pour les calculs. L'estimation des données manquantes est entachée d'incertitudes, et ce, quel que soit le procédé mis en œuvre (Ardoin-Bardin, 2004).

2-1-4 Comblement des données manquantes

L'analyse des séries d'observations pluviométriques révèle que les stations disponibles présentent des lacunes à l'échelle mensuelle (de un à plusieurs mois) et donc annuelle, ces lacunes sont dues soit à l'absence de l'observation soit à une défaillance du pluviomètre. Le comblement de ces données manquantes a été établi à l'aide de la méthode de corrélation linéaire. C'est un outil statistique qui permet d'étudier la force d'association entre deux variables linéaires (Dumolard *et al.*, 2005), il définit une loi. La droite de régression représente la tendance moyenne de corrélation entre x et y . Le but est de linéariser la représentation du phénomène sous la forme : $y = ax + b$

La corrélation est établie soit entre les données de différentes années sur la même station, soit entre les données de la station d'étude et celles d'une station voisine. Cette corrélation est retenue si et seulement si le coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 75 %. Cependant les années ne disposant d'aucune donnée n'ont pu faire l'objet de comblement afin de ne pas biaiser les résultats.

La méthode de comblement par prévision permet de calculer ou de prévoir une valeur capitalisée à partir de valeurs existantes. La valeur prévue est une valeur x pour une valeur y donnée.

Les valeurs connues sont des valeurs x et y existantes, et la nouvelle valeur prévue est calculée par la méthode de régression linéaire. L'équation de la fonction

Prévision est $a + bx$, où $a = \bar{y} - b\bar{x}$ et $b = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$ avec \bar{x} et \bar{y} les moyennes

d'échantillon moyenne (\bar{x} _connus) et Moyenne (\bar{y} _connus), x représente l'observation dont la valeur va être prévue; y _connus représente la matrice ou la plage de données dépendantes; x _connus représente la matrice ou la plage de données indépendantes.

2-1-5. Estimation des champs de pluie

Parmi les méthodes couramment utilisées en hydro-météorologie pour estimer les précipitations sur des sites ayant peu ou aucune donnée, on peut distinguer d'une part, les méthodes d'interpolation spatiale (Delhomme, 1978; Creutin & Obled, 1982; Amani & Lebel, 1998) et, d'autre part, les méthodes d'analyse de fréquence régionale (Hosking et al., 1985; Ouarda et al., 1999 pour les crues, et (Alila, 1999) pour les précipitations). Les méthodes d'interpolation utilisent des approches géométriques (la méthode de trois stations les plus proches, les polygones de Thiessen) ou les fonctions de corrélation spatiale (krigeage) pour estimer à un site cible la précipitation associée à un événement ou à une fréquence donnée.

Dans les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin versant ou à proximité, on distingue la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen ou l'utilisation d'isohyètes. Le choix de la méthode dépend notamment de la longueur de la série de

données dont on dispose, la densité du réseau de mesure, et la variation du champ pluviométrique.

Pour estimer la lame d'eau précipitée, la méthode de polygone de Thiessen a été choisie. Le choix de cette méthode a été motivé par son application aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement). Elle est développée sous *l'extension analyse tools, proximity, create thiessen ploygons* de l'arc-gis 10.1.

Cette méthode, basée uniquement sur les pluies observées aux pluviomètres, consiste à attribuer à chaque pluviomètre une zone d'influence présumée telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près en distance horizontale de ce pluviomètre que de toute autre. Les éléments de surface plus proches d'un pluviomètre que de tout autre, sont déterminés par le réseau des médiatrices des segments joignant les postes deux à deux.

La précipitation moyenne pondérée P pour le bassin versant se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire S_i), le tout divisé par la surface totale S du bassin versant. La précipitation moyenne sur le bassin versant s'écrit :

$$P = \frac{\sum P_i S_i}{S}$$

P_i : précipitation de la station à l'intérieur du polygone

S_i : surface du polygone

S : surface totale du bassin versant

La figure 11, représente le découpage du bassin versant de la Sota en polygones ayant servi de base aux calculs des hauteurs pluviométriques moyennes.

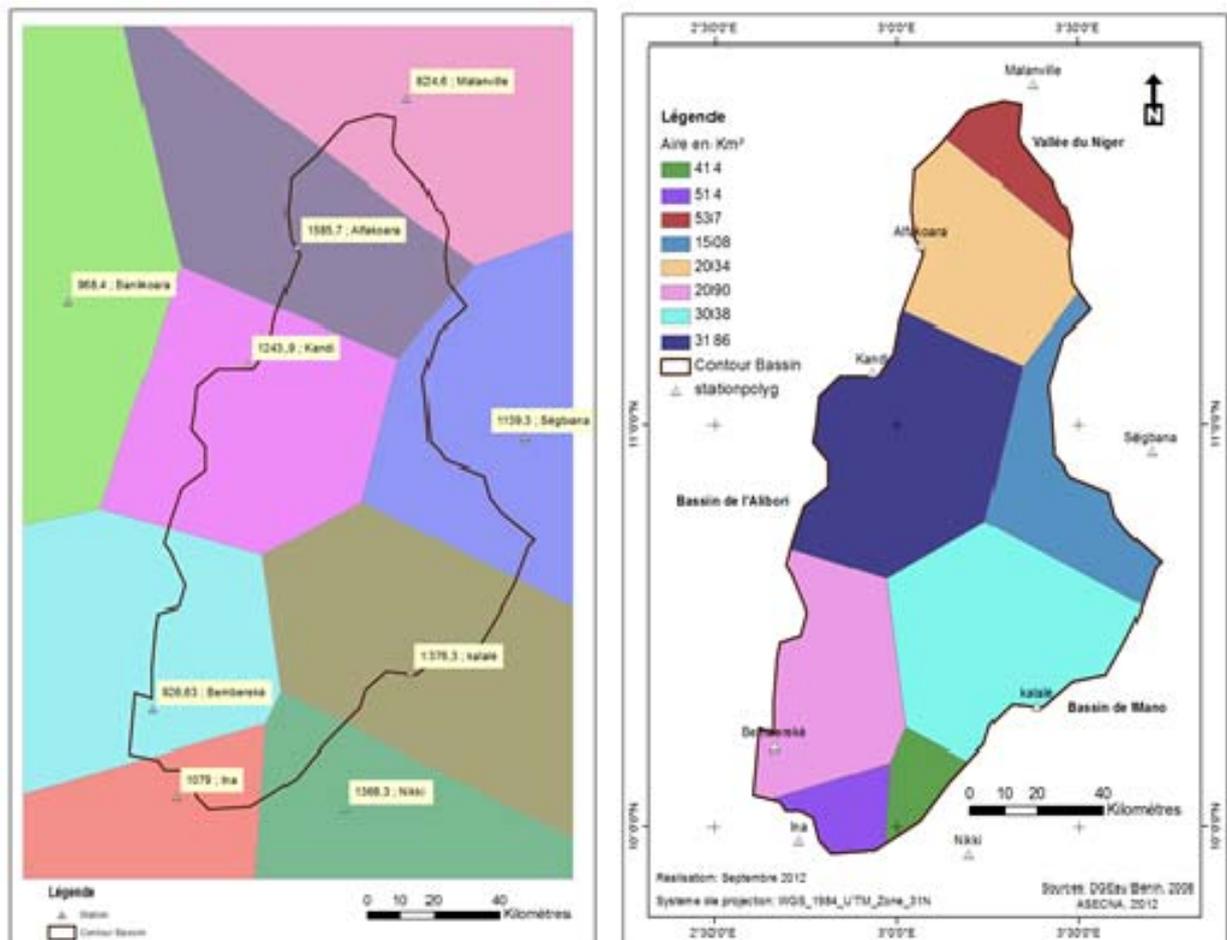


Figure 11: Découpage de bassin versant de la Sota par la polygation de THIESSEN

2-2. Techniques de collecte des données

Les investigations socio-anthropologiques ont porté sur les perceptions de la variabilité hydroclimatique, et des changements de l'occupation du sol, de leurs impacts sur l'environnement, les stratégies élaborées par les différents acteurs pour s'adapter aux risques hydroclimatiques; etc. Ces données sont collectées grâce aux enquêtes de terrain organisées par l'intermédiaire d'entretiens individuels ou de groupe à l'aide d'un questionnaire établi au préalable. Le but de l'enquête de terrain est de voir comment les risques hydroclimatiques sont perçus et vécus par de la population afin d'identifier les indicateurs pertinents de vulnérabilité à ces risques. Au cours de ces enquêtes, un échantillon composé essentiellement de la population agricole, des présidents d'association agricoles et de développement ayant une connaissance sur la variabilité climatique et la vulnérabilité des populations a été élaboré. A cela s'ajoutent les agents de développement rural, cadres techniques du ministère de l'agriculture, etc.

Le choix des personnes interrogées est fait sur la base des critères bien définis:

- avoir au moins quarante ans ;
- avoir vécu dans le milieu ces vingt dernières années,
- avoir une connaissance sur les différentes activités des populations.

Les enquêtes de terrain ont porté sur vingt et un (21) villages soit trois (3) par commune. Les villages ont été choisis en tenant compte du poids de ceux-ci dans la production de la commune et en fonction de l'importance des effets des risques hydroclimatiques.

La taille de l'échantillon a été déterminée en suivant la méthode de SCHWARTZ (2002). Elle a été calculée avec un degré de confiance de 95 % et une marge d'erreur de plus ou moins 5 %.

$$N = \frac{Z \alpha^2 PQ}{d^2}$$

Avec

N= taille de l'échantillon par village

Z α = écart fixé à 1,96 correspondant à un degré de confiance de 95 %

P = nombre de ménages du village / nombre ménages de la commune.

Q = 1 – P

d = marge d'erreur qui est égale à 5 %.

En outre, toutes les communes ont été prises en compte. En procédant ainsi par village choisis, un taux d'échantillonnage de 30 % est appliqué au résultat pour déterminer le nombre exact de ménages à questionner par village. Le tableau II, présente la taille de l'échantillonnage et le nombre de personnes ressources enquêtés dans le bassin versant.

Tableau II: Répartition de l'échantillon par commune dans le bassin versant de la Sota

Communes	Villages	Nombre de ménages	Taille de l'échantillon
Bemberekè	Guéré	252	10
	Bemberekè	356	14
	Ina	386	15
Gogounou	Gogounou	780	30
	Ouara	358	14
	Sori	558	22
Kalalé	Kalalé centre	481	19
	Dunkassa	542	21
	Bouka	685	27
Kandi	Kandi III	1110	41
	Saah	657	26
	Kassakou	507	20
Malanville	Madecali	746	29
	Bodjecali	651	25
	Tomboutou	333	13
Nikki	Sérékalé	354	14
	Kpawolou	362	14
	Sakabansi	934	35
Ségbana	Ségbana I	402	16
	Libante	403	16
	Sokotindji	318	13
Total	21	11175	435

Source : Traitement des données, 2012

Au total, 435 ménages agricoles ont été questionnés. A cela s'ajoute 21 personnes ressources, 35 agents de CARDER. Les personnes ressources sont composées des élus locaux, les directeurs techniques des mairies et des ministères. Des personnes âgées ayant des connaissances sur la dynamique des climats et des risques hydroclimatiques dans le bassin versant.

Au cours de l'enquête, les focus groups comprenant chacun huit individus ont été réalisés pour chacune des communes concernées (photo 1). Le questionnaire était axé sur la perception des variations hydroclimatiques, les principales activités, l'identification des principaux risques liés à la variabilité hydroclimatique, l'évaluation du niveau de vulnérabilité des différents secteurs d'activités soumis aux risques hydroclimatiques et enfin les mesures d'adaptation mises en place. Les différentes interviews ont permis de collecter les informations qualitatives sur la perception des populations de la variabilité hydroclimatique, les risques y afférents, les impacts sur les activités socioéconomiques et sur les ressources naturelles du bassin versant.



Photo 1: Séance de focus groupe à Malanville
Prise de vue : Koumassi; septembre 2012

2-3 Méthodes de traitement des données

Pour appréhender la vulnérabilité des populations aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota, le traitement des données a été fait à l'aide de plusieurs méthodes et les techniques de traitement statistiques, le traitement d'images satellitaires et le système d'information géographique pour la combinaison des données et la détermination des zones vulnérables et à risques d'inondation dans le bassin versant

2-3-1. Méthode de caractérisation hydropluviométrique

Afin d'analyser la variabilité interannuelle des indices pluviométriques et hydrométriques, les anomalies standardisées ont été calculées en utilisant la formule suivante:

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma(x)}$$

où : x'_i = anomalie centrée réduite pour l'année i

x_i = la valeur de la variable,

\bar{X} = la moyenne de la série.

$\sigma(x)$ = l'écart type de la série

Pour mettre en évidence les tendances pluviométriques et hydrométriques, la moyenne mobile a été calculée sur la même période et superposées graphiquement aux anomalies interannuelles standardisées. La technique des moyennes mobiles consiste à lisser les irrégularités en associant aux valeurs d'une chronique de nouvelles valeurs qui sont les moyennes arithmétiques d'une valeur originale et des valeurs qui l'encadrent. Les moyennes mobiles peuvent être calculées sur trois (3) ans ou cinq (5) ans. Cette méthode a permis d'avoir des séries hydrométriques et pluviométriques lissées sur les différents sous bassins versants au pas de temps journalier, mensuel et annuel

2-3-2. Détection des dates de rupture dans les séries temporelles

Une « rupture » de stationnarité est recherchée. Elle peut être définie par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un instant donné (Lubès et al., 1994). La détection des moments probables de rupture dans les séries temporelles vise à vérifier la non stationnarité des séries pluviométriques et hydrométriques, et à valider l'hypothèse sur la baisse pluviométrique et hydrométriques, depuis la fin des années 70. La détection des ruptures a été faite à partir des différents tests statistiques (test de Pettitt (1979), procédure de segmentation de Hubert (Hubert et al.1998), méthode statistique de U Buishand (1984) et procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977).

- Le test de PETTITT

L'approche de Pettitt (1979) est non paramétrique qui permet de détecter les « ruptures » dans les séries pluviométriques et hydrologiques dans le bassin versant de la Sota. Ce test dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population. Ce test repose sur le calcul de la variable $U_{t,N}$ définie par :

$$\text{Où } D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \text{sgn}(Z) = 1 \text{ si } Z > 0; 0 \text{ si } Z = 0 \text{ et } -1 \text{ si } Z < 0.$$

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$. Si K désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est donnée approximativement par :

$$\text{Pr ob}(K_N > K) \approx 2 \exp\left(-6 K^2 / (N^3 + N^2)\right)$$

Pour un risque α de première espèce donné, si $\text{Pr ob}(K_N > K)$ est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. Ce test est réputé pour sa robustesse.

- test de Mann-Kendall

Le Test de Mann-Kendall est un test non paramétrique qui permet de mesurer le degré de signification de la tendance et les ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques et hydrométriques.

Soit x_1, x_2, \dots, x_T une séquence de données. A chaque x_i est associé un nombre n_i comptabilisant les éléments x_j tel que $i > j$ et $x_i > x_j$. La statistique s'écrit alors :

$$t = \sum_{i=1}^T n_i, \text{ celle-ci sous l'hypothèse nulle de l'absence de tendance, suit une loi de répartition } E(t) = \frac{T(T-1)}{4}; \text{ var}(t) = \frac{T(T-1)(2T+5)}{72}. \text{ Sa formule est alors : } U(t) = \frac{t - E(t)}{\sqrt{\text{var}(t)}}$$

A cette statistique est associée une probabilité de signification, celle de détecter une tendance alors qu'il n'en existe pas. L'application progressive du test décrite par Sneyers (1975), permet de déterminer de manière détaillée les périodes où des groupes de valeurs supérieures ou inférieures à la moyenne apparaissent.

2-2-3. Comparaison de deux échantillons temporels

Cette évaluation a pour objectif de mettre en évidence la péjoration hydropluviométrique observée dans le bassin versant au cours des années 1970. Le choix des périodes sera issu des résultats de l'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les différentes séries. L'écart entre la moyenne m_1 de la période pré-1970 et la moyenne m_2 de la période post-1970 est déterminé par la formule suivante :

$$e = m_2 - m_1$$

Avec

m_1 = la moyenne de la période pré-1970

m_2 = la moyenne de la période post-1970

e = écart entre les moyennes m_1 et m_2

Déficit

$$Déficit = \frac{e}{m_1} \times 100 = (\text{en } \%)$$

- Test de Student

Le test de Student est un test paramétrique qui est utilisé pour comparer les hauteurs d'eau précipitées et écoulées au cours des deux périodes. Cette méthode nous a permis de caractériser et de valider les changements pluviométriques et hydrologiques entre la période pré-1970 et la période post-1970. Il s'écrit de la façon suivante :

$$t = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{S^2 + \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

Où : m_1 = moyenne de la période pré-1970, m_2 = moyenne de la période post-1970 et n_1 et n_2 les effectifs des sous séries.

S^2 = la valeur pondérée du groupe entier des deux échantillons se formulant comme suit :

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2}{n_1 + n_2 - 2}$$

S_1 , représente la variance du premier échantillon (pré-1970) et S_2 correspond à la variance du deuxième échantillon (post-1970).

La valeur « t » obtenue est comparée à une valeur tirée de la table de Student, pour un nombre de degrés de liberté ν , tel que

$$\nu = n_1 + n_2 - 2$$

2-3-4. Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame écoulée

- Coefficient de corrélation linéaire

Il est utilisé pour mesurer le degré de liaison ou de dépendance linéaire qui existe entre les lames précipitées et les lames écoulées sur les différents sous bassins versants de la Sota. Il permet d'obtenir le coefficient de détermination ($R=r^2$).

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}$$

Où : N est le nombre total d'individus ; x_i et y_i sont les valeurs des séries.

\bar{x} et \bar{y} sont les moyennes des variables ; $\sigma(x)$ et $\sigma(y)$ en représentent les écarts-types

2-3-5. Etude du bilan climatique

- Bilan climatique potentiel

Indicateur de la disponibilité en eau « un climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration et qu'il n'y a pas de réserve disponible » (Hufty 1976). Il estime la différence entre les abats pluviométriques et la valeur de l'évapotranspiration potentielle, il s'exprime par la formule suivante :

$$Bcp = P - ETP$$

Si $P - ETP > 0$ alors le bilan est excédentaire ;

Si $P - ETP < 0$ alors le bilan est déficitaire ;

Si $P - ETP = 0$ alors le bilan est stable (équilibré).

- Bilan climatique réel

Il s'exprime par la formule suivante :

$$Bcr = P_e = P - ETR \text{ avec}$$

P_e (pluie contribution de la pluie à l'écoulement, P (pluie en mm), ETR (évapotranspiration réelle en mm)

Le bilan climatique réel est appelé contribution de la pluie à l'écoulement.

2-3-6.Méthode d'étude du bilan hydrologique

L'étude du bilan hydrologique est indispensable pour estimer les ressources en eau du bassin versant, évaluer l'impact des fluctuations pluviométriques sur les autres termes du bilan (Vissin, 2007). Le bilan hydrologique permet de mettre aussi en évidence la relation existant entre la sécheresse pluviométrique observée depuis 1970 et la sécheresse hydrologique au cours de ces dernières décennies. De même, il permet de quantifier l'écoulement qui est l'un des mécanismes générateurs des inondations. La dynamique des écoulements permet de suivre aussi l'évolution de la réponse hydrologique dans les sous bassins versants.

L'équation du bilan hydrologique utilisée pour cette étude est celle de Le Barbé *et al.*, (1993). Elle s'écrit :

$$P = E + L + I + (S_1 - S_0)$$

Avec :

P = pluie, en mm

E = évaporation, en mm

L = écoulement, en mm

I = infiltration, en mm

$S_1 - S_0$ = variation du stock d'eau présent sur le bassin versant, en mm

Des cinq (5) termes de cette équation, deux (2) (I et $S_1 - S_0$) ne sont pas quantifiables par des mesures directes.

Pour diminuer le nombre d'inconnus, la période a été choisie de façon que la variation ($S_1 - S_0$) puisse être supposée négligeable. Pour ce faire, nous avons décidé de travailler en année hydrologique, déterminée par la date des étiages absolus, dans cette région : le mois de mars. Le fait de travailler sur une année hydrologique nous permet donc de minimiser les erreurs de la variation du stock d'eau sur le bassin versant, et de ce fait, facilite l'estimation de l'infiltration (VISSIN, 2007). Toutefois, le problème de l'évaluation se pose de manière différente pour

chaque terme. L'infiltration n'est pas mesurée, elle devra donc être déduite des autres termes

2-3-6-1 Détermination de l'écoulement

Selon Vissin (2007), lorsqu'on veut faire le bilan hydrologique et qu'on dispose d'une ou des station(s) hydrométrique(s) bien suivies et bien étalonnées, le terme écoulement est connu de façon beaucoup plus précise que les autres, qui nécessitent toujours une régionalisation, car l'écoulement est la seule mesure directement faite sur le bassin versant. Malheureusement, les deux stations dont nous disposons sur le bassin versant de la Sota comportent des lacunes. Compte tenu de l'objectif de l'étude qui consiste à évaluer le bilan hydrologique sur la période 1965-2010, il est nécessaire d'essayer de combler ces lacunes.

Par ailleurs selon toujours le même auteur, l'équation du bilan, telle que exprimée précédemment, suppose qu'on détermine les écoulements causés par les pluies tombées au cours de la période. Une partie du volume V_{i-1} écoulé de l'année $i-1$, causé par la pluie P_{i-1} , se répercute sur le volume V_i de l'année suivante i causé par la pluie P_i . Pour apporter une correction aux lames écoulées observées au cours de l'année hydrologique i ; pouvons l'appliquer au débit moyen du dernier mois de l'année hydrologique Q_{mars} connaissant la loi de tarissement de MAILLET. Pour faire cette correction, on estime que le volume V_{i-1} en m^3 de l'année hydrologique $i-1$ qui reste à s'écouler est :

$$V_{(i-1)} = \int_0^{\infty} Q_{mars_{(i-1)}} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) dt \Rightarrow V_{(i-1)} = Q_{mars_{(i-1)}} Tar$$

De même, à la fin de l'année i , il reste à s'écouler un volume V_i qui est :

$$V_i = \int_0^{\infty} Q_{mars_i} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) dt \Rightarrow V_i = Q_{mars_i} Tar$$

Ainsi, la lame d'eau provenant de la pluviométrie observée au cours de l'année est :

$$Léc_1 = Lem_{(i-1)} + (Q_{mars_i} - Q_{mars_{(i-1)}}) \times \frac{Tar}{S}$$

Avec : $Léc_i$ = lame écoulée due aux pluies de l'année i (mm)

Lem_i = lame écoulée effectivement mesurée au cours de l'année i (mm)

Tar = durée du tarissement (en seconde (s))

S = surface du bassin versant (km^2)

$Qmars$ = débit de mois de mars (m^3)

$Qmars.Tar = Qmars \int_0^{Tar} Exp(-\frac{t}{Tar})dt$ est le volume correspondant à un tarissement complet.

Pour compléter les lacunes, il faut un modèle. Pour le faire, nous avons choisi d'utiliser la méthode de Sutcliffe et Piper (1986) qui met en relation la lame écoulée corrigée non pas avec la pluviométrie totale mais avec la contribution de la pluie à l'écoulement, c'est-à-dire la pluie diminuée de l'ETR. Nous voulons montrer à ce stade que cette façon de procéder améliore la variance des erreurs d'estimation des lames écoulées.

2-3-6-2. Estimation de l'infiltration

La méthode d'estimation de l'infiltration adoptée ici est celle utilisée par Vissin (2007) qui n'est que le solde du bilan hydrologique. Les autres termes du bilan sont eux-mêmes connus avec une certaine imprécision. Cette imprécision va se répercuter sur l'infiltration estimée. Du fait de ces incertitudes, nous ne pouvons pas assimiler directement l'infiltration à la recharge de la nappe. Néanmoins, l'analyse de ce paramètre peut traduire l'évolution de la recharge sur le bassin versant. On peut la définir par:

$$I = P - (L + E)$$

Avec I = Infiltration en mm ; P = pluie en mm, L = écoulement en mm

2-3-6-3. Estimation de l'évaporation réelle

L'estimation de l'évaporation réelle est faite à partir de l'équation suivante :

$$ETR = \alpha.ETP$$

L'utilisation de cette formule nécessite la connaissance des paramètres ETP et α .

L'ETP est, par définition, l'évaporation maximale que pourrait fournir un couvert végétal (gazon) suffisamment irrigué pour satisfaire la demande en eau de l'atmosphère (Vissin,2007 ; Amoussou,2010). Elle est donnée par la formule de PENMAN (qui utilise plusieurs paramètres climatologiques : pression atmosphérique, tension de vapeur, radiation, insolation, rayonnement global...). C'est cette formule

essentiellement basée sur le bilan radiatif qu'a utilisé le Service de la Météorologie Nationale (SMN).

Le coefficient α est toujours inférieur à 1 et traduit la disponibilité en eau dans les premiers horizons du sol. Il faudra pour l'exprimer de façon rigoureuse, connaître à la fois le stock d'eau présent dans le sol et les résistances opposées par le système sol/végétation à l'évaporation. Nous avons donc adopté la même hypothèse que Sutcliffe et Piper (1986) à savoir :

- Si $P_i > ETP$ alors $\alpha = 1$
- Si $P_i < ETP$ alors $\alpha = \frac{P_i}{ETP_i}$

Cette façon de faire est très approximative lorsqu'elle s'applique à l'échelle mensuelle, car ne donne de résultats satisfaisants que les mois très pluvieux et les mois secs. Par contre, il y a une compensation entre les erreurs de début et de fin des saisons de pluie grâce à la surestimation (car il faudrait reconstituer les réserves en eau du sol et régénérer la végétation) et la sous-estimation (à cause des réserves d'eau dans le sol) de l'ETR.

2-3-7. Méthode de traitement des données environnementales

Les bandes Landsat multi spectrales TM et ETM+ pour les années 1978,1998 et 2010 ont été utilisées pour détecter les changements intervenus entre ces trois années, soit ceux liés à d'éventuelles causes naturelles ou anthropiques. Parmi les différentes méthodes suggérées pour la détection du changement, l'analyse en composantes principales (ACP) est la plus souvent utilisée (Byrne et *al.*, cité par Mara, 2010). Cette méthode d'analyse statistique multi variée sert à réduire le nombre de composantes spectrales et rend mieux compte de la variance des images multi spectrales originelles. Les pixels inchangés se retrouvent dans les premières composantes et prennent les valeurs proches de 0 et ceux liés au changement dans les dernières composantes prennent des valeurs plus importantes (Byrne et Craper, cité par Mara, 2010). Elle se réalise à partir de deux bandes privilégiées au lieu de toutes les bandes spectrales. Les bandes choisies pour effectuer l'analyse en composantes principales ont été les bandes proches infrarouges (0,7 μ m -1,1 μ m) . Ces opérations ont été effectuées au préalable par le CENATEL.

2-3-8.Méthode d'analyse de la sécheresse

L'analyse de la sécheresse revient en fait, à la prise en considération de sa durée ainsi que de sa sévérité, de son intensité et de son extension spatiale (Sibou, 2005). Vu la complexité du phénomène, il est difficile de faire une analyse exhaustive de la sécheresse dans toutes ses composantes. La recherche d'indices bioclimatiques permettant de caractériser le plus simplement possible le niveau de sécheresse a été une préoccupation importante de la communauté scientifique dans la première moitié du XXe siècle (Curé, 1945). Les textes statistiques sont les plus indiqués pour caractériser la sécheresse. Ceux-ci ne font appel qu'à une seule variable. Ils utilisent généralement les mesures de précipitation recueillies aux stations météorologiques pour décrire les conditions de sécheresse. Beaucoup d'auteurs se sont penchés sur la possibilité de mettre au point des indices permettant d'identifier la sécheresse et mettre en évidence les fluctuations temporelles des précipitations.

2-3-8-1. Indice de l'écart à la moyenne

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la médiane est le plus utilisé par les agrométéorologues. Bien évidemment, quand l'échantillon de données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la médiane est grande (Khaldi, 2005 ;Jouili *et al*; 2013). L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P_i) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (P_m).

$$E_m = P_i - P_m (l)$$

L'écart est positif pour les années humides et négatifs pour les années sèches. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée. Cet indice permet de visualiser et de déterminer le nombre d'années déficitaires et leur succession.

2-3-8-2. Rapport à la normale des précipitations

Cet indice, qui est exprimé en pourcentage, peut être obtenu en divisant la précipitation annuelle par la précipitation normale et en multipliant le résultat par 100 % (Khaldi, 2005 ;Jouili *et al*; 2013). Cet indice est exprimé mathématiquement en pourcentage comme suit :

$$\text{RN}(\%) = (\text{Pi}/\text{Pm}) \times 100$$

Où : RN : rapport à la normale des précipitations en pourcentage.

Pi : précipitation annuelle (en mm).

Pn : précipitation normale (en mm).

Le rapport à la normale en pourcentage permet d'estimer la variation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale.

Ce rapport permet une estimation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale : Une année est classée comme sèche si la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque le RN est inférieur à 100 % (Rognon, 1997).

2-3-8-3. Indice de déficit pluviométrique (Indice de l'écart à la normale)

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$\text{IDP} (\%) = (\text{Pi} - \text{Pm})/\text{Pm} \times 100$$

Où :

IDP : Indice de déficit pluviométrique (en pourcentage).

Pi : précipitation annuelle (en mm).

Pm : précipitation moyenne (en mm).

Cet indice nommé aussi Ecart à la normale, permet de visualiser et de déterminer le nombre des années déficitaires et leur succession.

Une année est qualifiée d'humide si cet indice est positif de sèche lorsqu'il est négatif.

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des écarts croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche » dans le cas contraire

2-3-8-4. Indice de pluviosité

C'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle à la hauteur moyenne annuelle de précipitation.

$$\text{Ip} = \text{Pi}/\text{Pm}$$

Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1. Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne (I_{pm}) qui diffère de l'indice de pluviosité en soustrayant 1 de cet indice (Khaldi, 2005 ; Jouili *et al.*; 2013).

$$I_{pm} = I_p - 1$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche », dans le cas contraire.

Lorsque la hauteur moyenne annuelle présentée est calculée sur une période assez longue, et que la distribution n'est pas très loin de la loi normale on peut utiliser le rapport à la normale au lieu de la moyenne.

2-3-8-5. Méthode des écarts types

Cet indice se base sur la comparaison de la pluviométrie actuelle au nombre d'écarts types comme indiqué dans le tableau III.

Tableau III: Sévérité de la sécheresse selon la méthode de nombre d'écart type

Classes	Limites de sévérité
Extrêmement sèche	$P_i < P_m - 2\sigma$
Sévèrement sèche	$P_m - 2\sigma < P_i < P_m - \sigma$
Modérément sèche	$P_m - \sigma < P_i < L_i$
Normal	$L_i < P_i < L_s$
Modérément humide	$L_s < P_i < P_m + \sigma$
Sévèrement humide	$P_m + \sigma < P_i < P_m + 2\sigma$
Extrêmement humide	$P_i > P_m + 2\sigma$

Source: Mckee *et al.*, (1993)

Où :

P_m : Pluviométrie moyenne

P_i : Pluviométrie de l'année i

σ : Écart type

L_i : Limite inférieure de l'intervalle de confiance

L_s : Limite supérieure de l'intervalle de confiance

Cette méthode a été employée à l'échelle annuelle vu que cette distribution suit une loi normale (la condition de normalité est vérifiée par le test de normalité de Shapiro Wilk).

Pour un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ de 95 % on calcule les bornes inférieures et supérieures. la formulation de l'intervalle de confiance autour d'une moyenne observée \bar{x} avec un écart type observé sur un échantillon de taille n est calculé comme suit :

$$Ic = \bar{x} - t\alpha\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right); \bar{x} + t\alpha\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

\bar{x} : Moyenne estimée

$t\alpha$: Valeur de la loi Normale

σ / \sqrt{n} : Erreur type

σ : Ecart type de l'échantillon

n : Taille de l'échantillon.

On considère la borne de confiance inférieure comme seuil de sécheresse, autrement dit une année est qualifiée comme climatiquement sèche si elle enregistre une quantité de précipitations inférieure à la borne de confiance inférieure, et normale si la quantité de précipitations enregistrée est comprise entre la limite inférieure et supérieure alors qu'une période est dite humide si la pluie enregistrée dépasse la limite supérieure

2-3-8-6. Indices de sévérité de la sécheresse

Pour mieux anticiper et suivre la sécheresse, il est possible en plus de l'identification des séquences sèches et de leur caractérisation, de déterminer l'ampleur de la sécheresse en termes de sévérité. Foley (1957) fut le premier à suggérer le calcul d'un indice donnant des informations sur la sévérité d'une sécheresse. Ce n'est que plus tard que des indicateurs de sécheresse plus pertinents furent définis. Les indicateurs de sévérité de la sécheresse les plus connus au niveau international sont l'indice de sévérité de palmer (PDI) et l'indice standardisé de précipitation(SPI). Dans la présente étude, seul l'indice standardisé de précipitation(SPI) est abordé compte tenu des données disponibles.

2-3-8-7. Indice standardisé de précipitation

L'Indice de précipitation standardisé (SPI Standardized Precipitation Index) (McKee *et al.* 1993, Hayes, 1996) est un indicateur statistique communément utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Il permet d'apprécier

l'ampleur de la sécheresse (ou de l'humidité) pour chacune des périodes de la série chronologique (Khaldi, 2005). L'Indice de précipitations normalisé (McKee et *al.*, 1993 ; 1995) est un indice simple, puissant et souple basé sur des données pluviométriques. Recommandé par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) en 2009 pour surveiller les sécheresses et gérer les risques liés au climat (Gibbs, 1975). Il est basé, comme son nom l'indique sur les données de précipitation et permet de qualifier les sécheresses météorologiques. Il a été développé en vue de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée et correspond à la transformation de la série temporelle des précipitations en une distribution normale standardisée de moyenne nulle et d'écart-type unitaire (distribution gaussienne). Cela revient donc à ajuster une fonction de densité de probabilité, la distribution de la fréquence des précipitations sommées ou moyennées, sur une échelle temporelle définie (généralement, 3, 6, 9, 12 et 24 mois). L'ajustement se fait séparément pour chacun des mois de l'année afin de conserver la saisonnalité. Chaque densité de probabilité cumulée est ensuite transformée en une distribution normale standardisée (Gaussienne), de moyenne nulle et d'écart type unitaire. Chaque valeur du SPI est alors reliée à un degré de sévérité et une probabilité d'occurrence de la sécheresse.

L'Indice de précipitation standardisé se fonde d'une part, sur la définition d'un seuil pour se prononcer sur l'état ou non de sécheresse en déclarant la période, objet de l'étude, sèche ou pas et présuppose d'autre part, l'identification de l'année normale ou moyenne. A l'issue de cette opération, il est possible de déterminer le nombre d'années par gamme SPI et la signification correspondante en terme d'ampleur du phénomène climatique (Tableau IV) à partir de l'équation suivante:

$$\text{SPI} = (P - P_m) / \sigma$$

Où :

P: Précipitation totale d'une période (mm)

P_m: Précipitation moyenne historique de la période (mm)

σ: Écart-type historique des précipitations de la période (mm)

Tableau IV: Classe de la sévérité sécheresse selon le SPI

Classe SPI	Interprétation
SPI >2	Humidité Extrême
1<SPI<2	Humidité Forte
0<SPI<1	Humidité modérée
-1<SPI<0	Sécheresse Modérée
-2<SPI<-1	Sécheresse Forte
SPI<-2	Sécheresse Extrême

Source: Mckee et al., (1993)

2-3-9. Méthode d'analyse de risque d'inondation

De nombreuses méthodes de détermination du risque d'inondation ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles à des méthodes de pondération entre différents critères affectant le risque (Gogu et Dassargues cité par Renaud (2006)). Dans la présente étude la méthode d'étude du risque d'inondation utilisée consiste à analyser d'une part l'aléa par l'analyse fréquentielle des pluies maximales et des débits maximaux et d'autre part la méthode de cartographies à index. C'est une méthode qui est basée sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de risque), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple).

2-3-9-1. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle permet de caractériser l'ampleur des événements extrêmes enregistrés afin d'en définir les probabilités d'occurrence (Meylan et Musy, 1999). Elle est l'un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes. C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel T_x auquel est associé une période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement $p = 1/T$). L'estimation T_x de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x;\theta)$ à un échantillon de n observations $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, où θ représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F .

Pour estimer la probabilité d'apparition d'un évènement hydrométéorologique, on dispose d'une série de débits ou de séries pluviométriques sur une période d'observation P_{obs} . L'évènement hydrométéorologique observé doit être échantillonné pour sélectionner les valeurs maximales (débits de pointe pour les crues et précipitations maximales journalières pour les précipitations). L'évènement ainsi échantillonné est ajusté à une loi de probabilité. On peut ainsi définir :

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

Où dq : variation élémentaire de Q .

La probabilité de non occurrence d'un débit supérieur à q est :

$$F_Q(Q) = P[Q \leq q] = \int_0^q f_Q(q) dQ$$

La probabilité d'occurrence d'une crue, avec un débit supérieur à q , est définie par :

$$P[Q > q] = 1 - F_Q(q) = 1 - \int_0^q f_Q(q) dQ$$

La série de débits et des précipitations constituent donc l'information de base pour la prévision évènements hydrométéorologiques

Pour définir la probabilité d'apparition d'un débit ou d'une précipitation, les étapes à suivre sont :

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

-Echantillonnage de débits

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

- Valeurs maximales annuelles

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

- Valeurs supérieures à un seuil

Cette méthode consiste à sélectionner la variable qui dépasse une variable seuil fixe q_s . La sélection dépend uniquement de ce seuil, dont le choix est délicat. Plus le seuil est élevé, plus les maxima sont indépendants, et plus courte est la série. Plus le seuil est bas, plus nombreuses seront les crues retenues, mais les maxima seront dépendants les uns des autres car appartenant au même événement (Valencia, 2006)

- Vérification des hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité

- **Indépendance** : ce test consiste à vérifier l'absence d'auto corrélation entre les débits. Ce test est particulièrement important lorsque l'échantillonnage se fait à partir des valeurs supérieures à un seuil car il est alors probable que deux débits consécutifs soient dépendants

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

- Choix d'une loi statistique

L'ajustement d'une loi statistique à la série de débits échantillonnée ($q_1; q_2; \dots; q_N$) permet de prévoir la probabilité d'apparition d'une crue ou d'une précipitation à partir de la fonction de répartition de débits ou des précipitations $FQ(.)$ ou de la densité de probabilité $f Q(.)$. Cet ajustement est fait sur la base d'un échantillon ordonné pour lequel une probabilité au dépassement p ou une probabilité au non dépassement q ($q = 1-p$) est calculée. Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées. Celle utilisée dans cette étude est la formule de Cunnane (1978) :

$$q = \frac{k - a}{n - 2a + 1}$$

où k est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée),

n est la taille de l'échantillon et

$a = 0,5$ (constante de la formule de Hazen).

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

$$T = \frac{1}{1 - q}$$

- Choix du modèle fréquentiel

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

- Loi de Gumbel

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

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

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 et les débits.

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

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

- Ajustement du modèle fréquentiel

La technique d'ajustement utilisée est la méthode graphique. Cette méthode repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite. En

conséquence, les points de la série à ajuster sont reportés dans un système d'axes (x ; y). A partir de ce système d'axes, il a été alors possible de tracer la droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b définissant la loi.

- Loi de Pearson

La loi de Pearson 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 $u=a$. Q comme variable réduite, avec $a = 1/s$, étant le paramètre d'échelle.

Dans ces conditions, la fonction de répartition s'écrit:

$$F(Q) = \frac{a\lambda}{T\lambda} \int e^{-aQ} Q^{\lambda-1} d$$

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

Avec l' λ est calculé à partir d'une fonction complexe:

$$g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log \frac{Q_i}{N}$$

- Contrôle de l'ajustement

Avant tout autre test statistique, il est préférable de faire un ajustement graphique, (Miquel ; 1984), car c'est un critère simple et efficace qui permet de juger si une loi statistique est bien ajustée à la série de débits observés. Un contrôle plus rigoureux doit être effectué avec des tests comme le test X^2 , le test Kolmogorov-Smirnov ou le test d'Anderson-Darling, etc. (Miller et al.; 1992). Ces tests servent à juger si un échantillon provient d'une population qui suit une loi de distribution donnée.

Les diverses étapes de l'analyse fréquentielle sont présentées sur la figure 12.

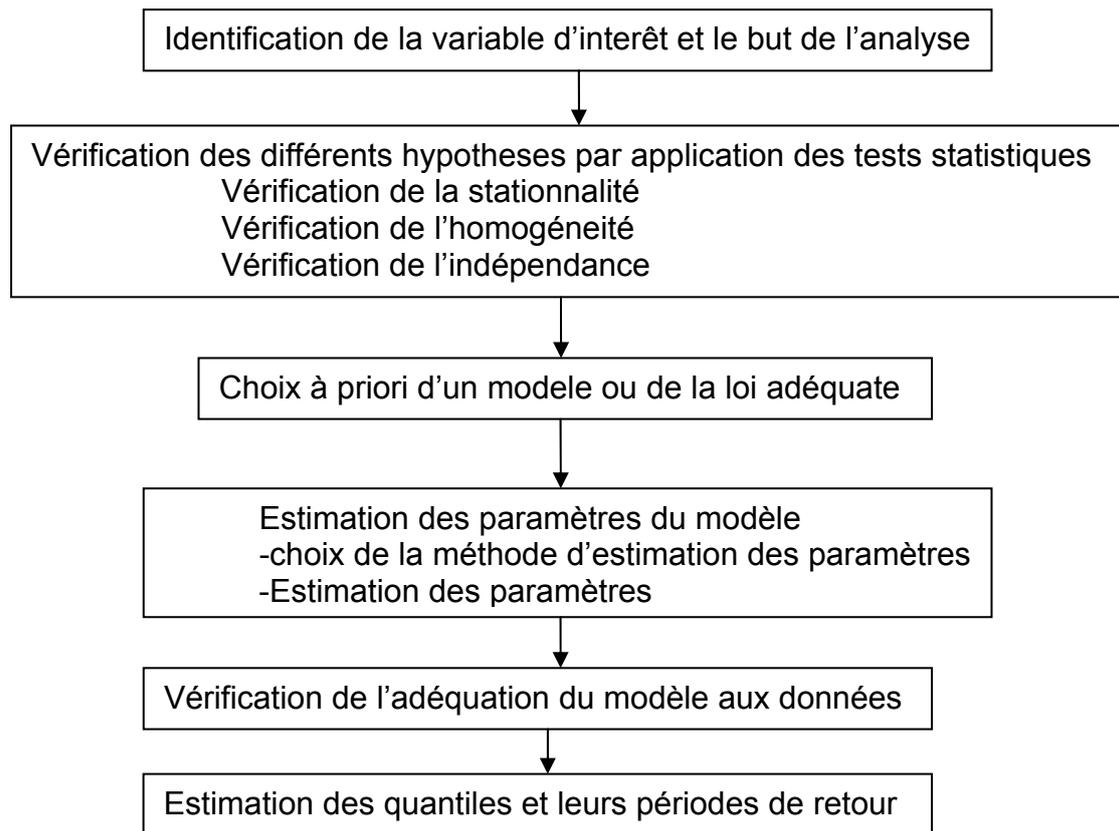


Figure 12: Principales étapes de l'analyse fréquentielle
Source : Benyahy *et al* (2004)

2-3-9-2. Méthode de détermination de l'aléa d'inondation

L'identification de l'aléa est la première phase de l'élaboration de la cartographie des risques. La carte des aléas résultent de la combinaison de la carte des isohyètes et de celle de la couverture du sol. Pour ce faire, trois niveaux sont retenus (faible, moyen et fort). A partir de la répartition de l'intensité des pluies réalisée à l'aide des données de précipitations (1960 - 2010), trois classes d'abondance pluviométrique ont été définies : faible (900 mm), moyen (900 – 1000 mm) et forte (> 1000 mm). Le deuxième paramètre est la couverture du sol. En prenant en compte le rôle des différentes unités d'occupation de sol dans la production des écoulements de surface, une classification est réalisée à partir des unités d'occupation du sol et a permis de retenir trois classes : faible (forêt dense, semi-décidue, galerie forestière et plantation), moyen (forêt claire, savane arborée et arbustive, champs et jachères), fort (agglomérations, formations marécageuses et plan d'eau). Le croisement de ces deux facteurs (pluviosité et couverture du sol) a permis de déterminer l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas climatiques pouvant engendrer des inondations dans le bassin versant. Cette méthode avait été déjà

utilisée en Côte d'Ivoire par Saley et *al.*, (2005) dans la région semi montagneuse et par N'guessan Bi (2011) dans le département de Sinfra.

2-3-9-3. Méthode de détermination de la vulnérabilité à l'inondation

Plusieurs chercheurs (Adger et Kelly, 1999; Downing, 2003 et Downing et *al.*, 2005) se sont intéressés à l'analyse de la vulnérabilité des populations aux risques hydroclimatiques dans plusieurs régions du globe. L'analyse de la vulnérabilité demande l'utilisation de plusieurs techniques et outils. La plupart utilisent les techniques statistiques telles que la régression, la corrélation, l'analyse en composantes principales ainsi que la combinaison et la superposition des différentes sources d'informations via les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Pour déterminer la vulnérabilité et le risque d'inondation dans le bassin versant, la méthode de combinaison et de superposition a été retenue. Pour ce faire les variables définies sont les suivantes : la densité de drainage, la lithologie, le domaine structural, la pente, le type d'occupation du sol, et l'intensité pluviométrique. Le traitement des différentes variables a permis de dresser des cartes thématiques. La première des cartes est celle des pentes, réalisée sur la base du MNT ASTER V2, la carte géologique, la carte de densité de drainage et celle des aires d'influences des principaux cours d'eau. La combinaison de ces différentes cartes en utilisant l'outil Raster calculator sous Arc-Gis a permis l'élaboration de la carte de vulnérabilité du bassin versant à l'inondation.

2-3-9-4. Méthode de détermination des zones à risque d'inondation

Pour obtenir la carte du risque d'inondations par débordement, la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été faite. Le risque d'inondation est défini comme le croisement de l'aléa préalablement défini et à la vulnérabilité. Un aléa d'inondation fort dans une zone faiblement vulnérable est fortement risqué. Les principales étapes de l'analyse de la vulnérabilité à l'inondation et du risque d'inondation sont résumées par la figure 13.

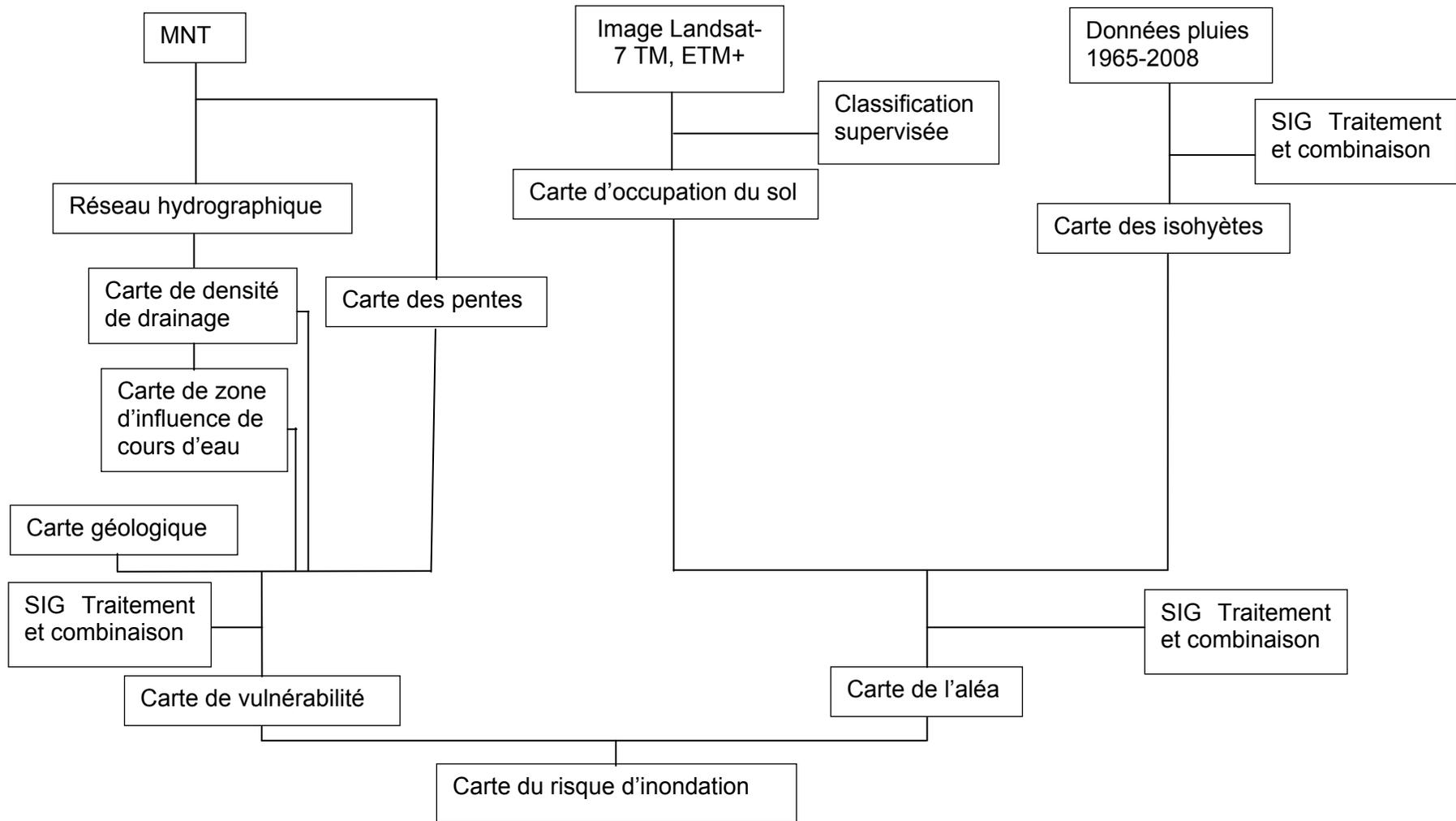


Figure 13: Organigramme des étapes de cartographie du risque d'inondation:

Source : Saley et al.,(2005)

2-3-9-5.. Méthode de détermination de la vulnérabilité socio-économique

La vulnérabilité d'un système aux variabilités hydroclimatiques désigne la mesure dans laquelle un système est sensible ou incapable de faire face aux effets défavorables des variations hydroclimatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation. Trois facteurs déterminent la vulnérabilité d'un système aux variations hydroclimatiques: la nature des variations climatiques auxquelles il est exposé ; sa sensibilité au climat ; sa capacité de s'adapter à la variation des conditions climatiques. Les différentes étapes de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économiques aux variations hydroclimatiques sont résumées par la figure 14

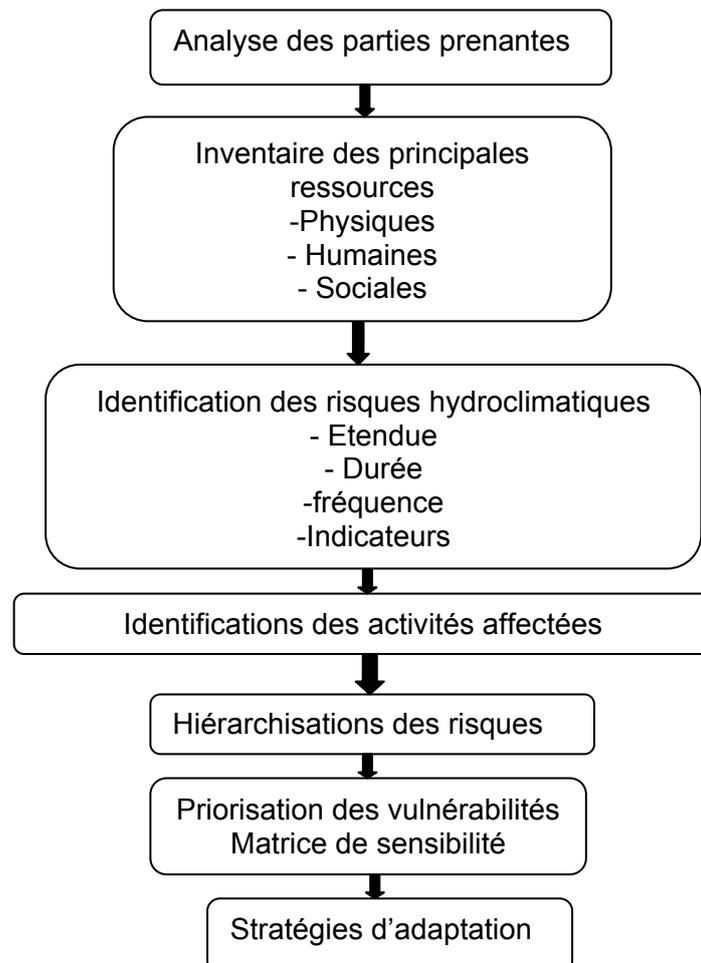


Figure 14: Etapes d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique
Source : Badolo, 2007

Pour analyser la vulnérabilité des modes et moyens d'existences, la matrice de sensibilité aux risques hydroclimatiques est dans la pratique utilisée (Badolo, 2007). C'est une approche méthodologique plus simple qui permet d'établir la sensibilité aux risques climatiques. La mise en œuvre recouvre plusieurs étapes à savoir :

Etape 1 : elle consiste à établir la liste des unités d'exposition dans la région considérée qui vont être prise en compte dans l'exercice de l'analyse de la vulnérabilité. Ces secteurs ou unités d'exposition vont former les lignes de la matrice de sensibilité ;

Etape 2 : la deuxième étape consiste à établir un inventaire des risques hydroclimatiques les plus significatifs pour les secteurs ou unités d'exposition dans la région considérée.

Etape 3 : la troisième étape est celle de l'évaluation du degré de sensibilité de chaque secteur ou unité d'exposition à chacun des risques climatiques retenus. Pour ce faire, on va considérer cinq niveaux de sensibilité comme l'illustre le tableau V.

Tableau V : barème notation de la sensibilité aux risques hydroclimatiques

Echelle de grandeur	Sensibilité au risque
1	Faible
2	Assez faible
3	Moyen
4	Assez fort
5	Fort

Le tableau VI quand lui, présente le cadre conceptuel de la matrice de sensibilité

Tableau VI: Présentation formelle d'une matrice de sensibilité

Unités d'exposition	Risques hydroclimatiques			Indice d'exposition	Classement
	Risque climatique1	Risque climatique 2	Risque climatique 3		
Unité d'exposition 1					
Unité d'exposition 2					
Indice d'impact					

Source : Badolo, 2007

L'application de la matrice produit trois indicateurs:

- l'indice d'exposition ;
- le rang en termes d'exposition des unités d'exposition aux risques climatiques ;

- l'indice d'impact des risques climatiques

La valeur de l'indice d'exposition pour une unité d'exposition est donné est la somme des colonnes pour chaque ligne de la matrice. La valeur de l'indice d'impact pour un risque donné est la somme des lignes pour chaque risque. Cet indice peut être utilisé pour établir une hiérarchisation des risques dans la localité considérée par rapport aux unités d'exposition considérés.

L'approche méthodologique adoptée dans la présente étude a permis de sélectionner les outils et de collecter les données nécessaires disponibles permettant d'analyser la variabilité hydroclimatique et d'identifier les principaux facteurs qui caractérisent la vulnérabilité des populations sur le bassin versant de la Sota. Les étapes méthodologiques suivies ont été réalisées en tenant compte des objectifs fixés.

DEUXIEME PARTIE
CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE ET
INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES
ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE
DE COUBERI

CHAPITRE III:

CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Ce chapitre est consacré à la caractérisation de la variabilité hydroclimatique dans le bassin versant. En effet, depuis la fin des années 1960, le bassin versant de la Sota, comme l'ensemble des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et centrale, connaît une intensification de la variabilité climatique. Elle se traduit par de rapides bouleversements locaux et globaux des conditions climatiques, des phénomènes exceptionnels voient leurs fréquences augmenter; les températures sortent des gammes de valeurs observées jusqu'ici ; des boucles de rétroaction dans l'atmosphère, vis-à-vis de l'augmentation de température, font que la circulation générale des masses d'air et par suite la répartition des précipitations sont modifiées (Courel et *al.*; 1984).

3-1. Variabilité climatique dans le bassin versant de la Sota

La variabilité climatique en Afrique de l'ouest se manifeste par une dynamique spatio-temporelle régressive des pluies annuelles, une récession des fréquences de jours pluvieux en général et une diminution de la durée des saisons pluvieuses. Les variations climatiques observées pendant les dernières décennies influencent énormément les ressources en eau et le fonctionnement des écosystèmes (Kouassi et *al.*, 2010).

Des études globales et locales menées en Afrique par différents auteurs (Hubert et *al.*, 1989; Mahé & Olivry, 1995; Servat et *al.*, 1999; Paturel et *al.*, 2002 et 2004) et particulièrement au Bénin (Boko, 1988 ; Bokonon-Ganta, 1987; Houndénou, 1992 et 1999, Vissin ; 2007 ; Amoussou, 2010), mettent en évidence les impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et l'environnement. Les résultats de ces études montrent que les précipitations subissent une baisse à partir des années 70. Cette baisse de la pluviométrie est importante, même dans les zones à forte pluviométrie (Kouamé et *al.*; 1999 ; Savané et *al.*, 2001).

Pour caractériser la variabilité climatique sur le bassin versant de la Sota, la moyenne spatialisée de la pluie est calculée au pas de temps annuel et mensuel dans le bassin versant de la Sota et les sous bassin versant de la Sota à l'exutoire

de Coubéri et de la Sota à l'exutoire de Gbassè. Ainsi, la variabilité est caractérisée aux échelles annuelle, mensuelle.

3-1-1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota

L'analyse de la variabilité interannuelle des pluies dans le bassin versant de la Sota porte sur la période de 1960-2010. La figure 15 traduit la variabilité interannuelle de la pluie dans le bassin versant de la Sota

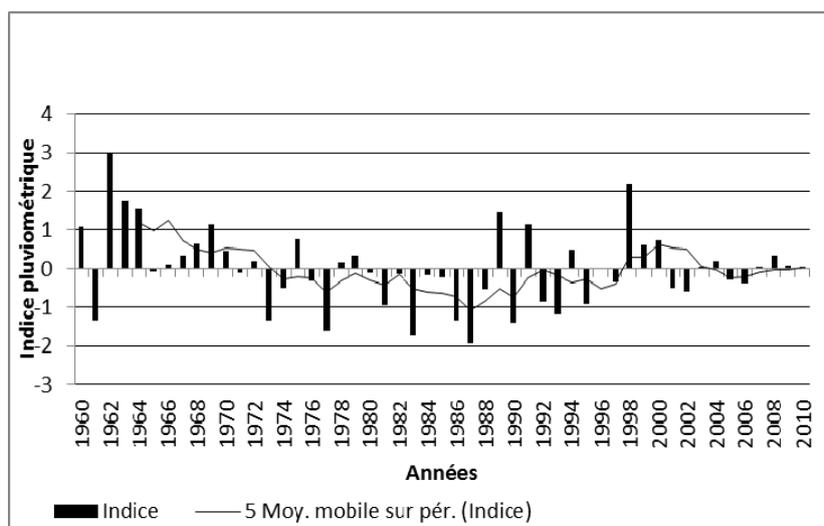


Figure 15: variabilité interannuelle des pluies dans le bassin versant de la Sota (1960-2010)

L'analyse de cette figure 15 a permis d'observer une non stationnarité de l'évolution pluviométrique de 1960 à 2010. Trois phases sont identifiées dans l'évolution de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota. La première phase est marquée par des excédents pluviométriques, et concerne la période 1960-1972 ; la deuxième sous-série est caractérisée par des déficits pluviométriques entre la période 1973-1990. La troisième phase est caractérisée par une très forte instabilité dans l'évolution de la pluviométrie et concerne la période 1991-2010. Cette variabilité pluviométrique observée dans le bassin versant est conforme à ce qui a été observé dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations de la sous-région de l'Afrique de l'Ouest (Olivry, 1974 ; Sircoulon, 1976 ; Hubert et *al.*, 1989; Mahé & Olivry, 1995 ; Paturol *et al.*, 1996 ; Servat *et al.*, 1999) et particulièrement au Bénin (Boko, 1975 et 1988a ; Bokonon-Ganta, 1987 ; Houndénou, 1992 et 1999 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010).

3-1-2. Variation pluviométrique dans les sous bassins versants de la Sota

La figure 16 traduit l'évolution de l'indice pluviométrique des sous bassins versants hydrologiques de la Sota de 1960 à 2010.

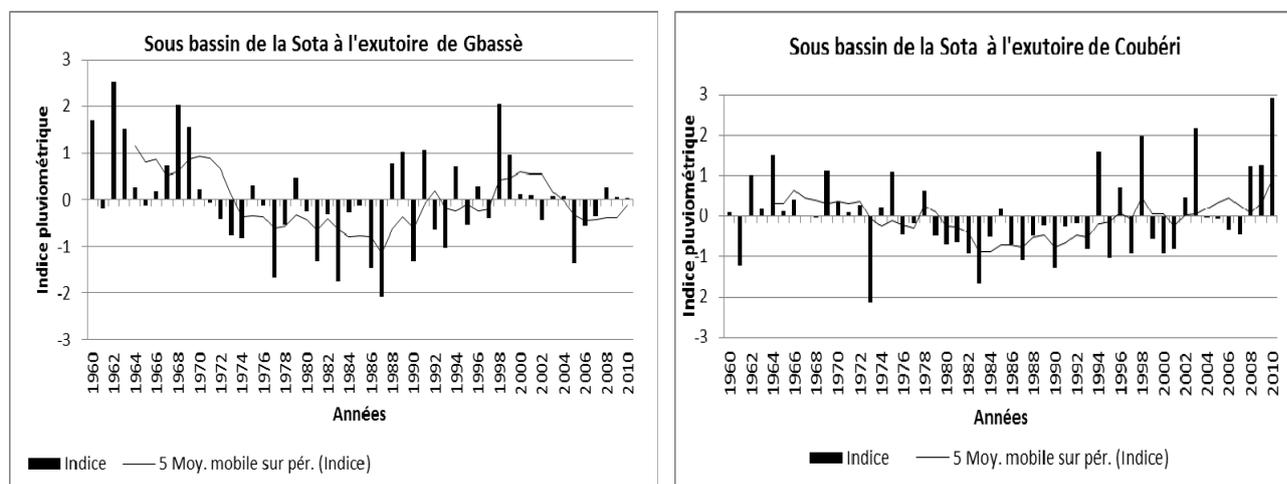


Figure 16: Indice pluviométrique dans les sous bassins versants de la Sota

L'analyse de la variabilité interannuelle des anomalies pluviométriques des sous bassins versants de la Sota montre une tendance générale à la baisse depuis les années 1960. Ce résultat confirme celui obtenu par Vissin, (2007), qui avait montré une baisse sensible des indices pluviométriques dans l'ensemble du bassin versant béninois du fleuve Niger. Toutefois, une légère remontée a été observée au début de la décennie 1990 dans le sous bassin versant de la Sota à Gbassè comme l'avait également montré Vissin (2007) dans le bassin versant de la Sota. D'autres auteurs (L'Hôte *et al.*, 2002 et 2004), avaient indiqué une amélioration des conditions pluviométriques au cours de la même période mais cette amélioration n'a encore atteint les niveaux des décennies (Paturel *et al.*, 2002, Ardoin *et al.*, 2003).

3-1-1-2. Rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques

Selon Servat *et al.* (1998), une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées. Pour Lubes *et al.* (1994), le test de rupture doit être compris comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. Plusieurs approches permettent de mettre en évidence les ruptures. Parmi les procédures statistiques souvent utilisées dans des études des séries hydrométéorologiques, deux sont

mises en œuvre dans la présente étude, le test de Pettitt et la procédure de segmentation de Hubert. Elles ont été largement utilisées pour l'étude de la stationnarité de séries chronologiques (Hubert et Carbonnel, 1989 ; Servat *et al.*, 1998 et 1999 ; Paturel *et al.* 1997a). Ils sont plus robustes et communément utilisés Pettitt (1979) et (Hubert *et al.*; 1998). Ces deux approches permettent de déterminer d'éventuels points de changement et donc de découper la série originelle en sous-séries stationnaires homogènes (Koita ; 2010). La figure 17 montre le test de Pettitt et de Buishand appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1960-2010) dans le bassin versant de la Sota.

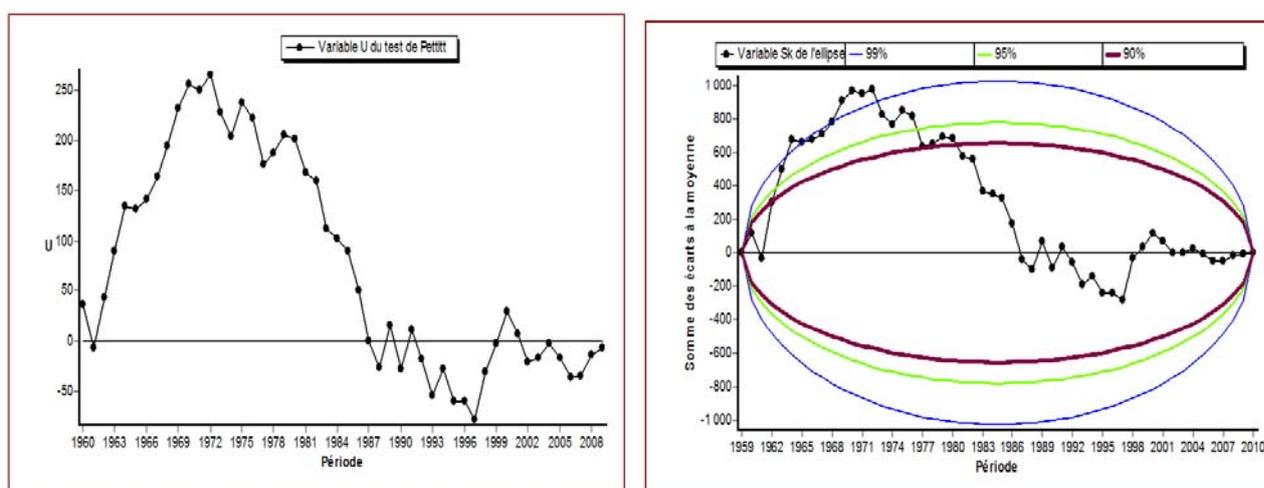


Figure 17: Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand dans les séries pluviométriques du bassin versant de la Sota

Le test de Pettitt complété par le test de buishand, appliqué aux séries pluviométriques montre une rupture de stationnarité, significative au seuil de 90 % au début des années 1970, la statistique de coupure atteignant son maximum en 1971. Ces résultats confirment la rupture de stationnarité des années 1970, 1971 soulignée par de nombreux auteurs en Afrique de l'Ouest (Fontaine, 1990), au Bénin (Boko, 1988 ; Perard et Bokonon-Ganta, 1993 ; Houndenou, 1999) et dans le bassin versant béninois du fleuve Niger (Vissin, 2001 ; Vissin *et al.*, 2003 ; Vissin *et al.*, 2004 et Vissin 2007).

3-1-3. Détection de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques des différents sous bassins versants

L'application du test de Pettitt (Figure 18) sur les séries 1960-2010 au niveau des deux sous bassins versants de la Sota montre que la rupture a eu lieu à partir de

1971 (Houndenou *et al.*, 2005 ; Vissin *et al.*, 2007) dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè alors que dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri, cette rupture s'est installée dans les années 1970 (Vissin *et al.*, 2006).

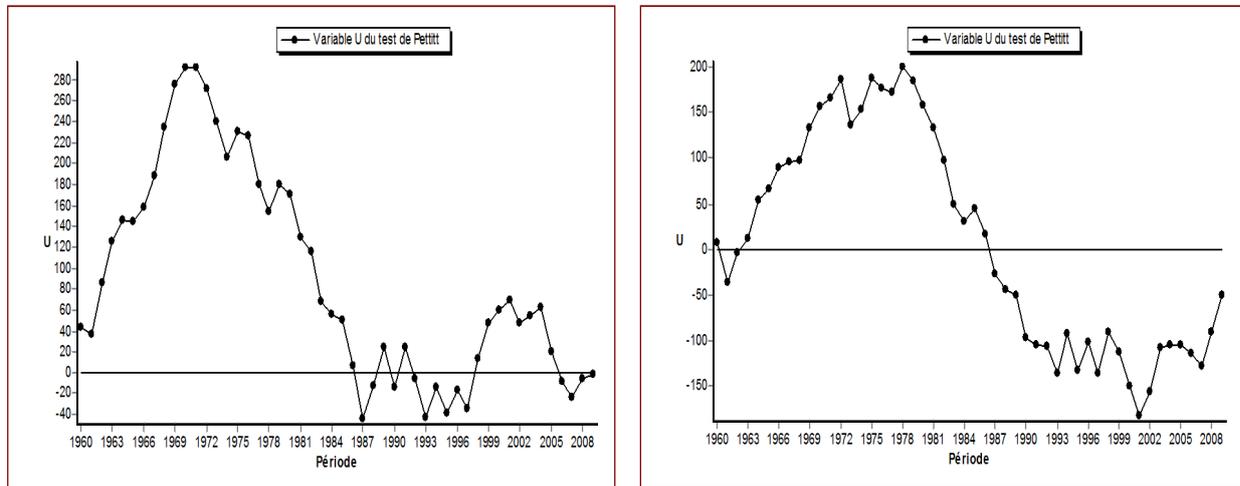


Figure 18: Rupture de la stationnarité par le test de Pettitt dans les sous bassins versants de la Sota

3-2. Bilan climatique

Selon Vissin (2007), le bilan climatique calculé au pas de temps annuel est déficitaire pour la période 1965-2008 dans tous les sous bassins versants, car l'évapotranspiration potentielle annuelle est supérieure à la pluie totale annuelle quelle que soit l'année considérée. Cependant, poursuit le même auteur, l'étude mensuelle montre que ce déficit n'est pas vérifié tout au long de l'année.

3-2-1. Bilan climatique mensuel dans les sous bassins versants

La figure 19 traduit le bilan climatique calculé au pas de temps mensuel dans les sous bassins versants de Gbassè et de Coubéri sur la période de 1960-2010.

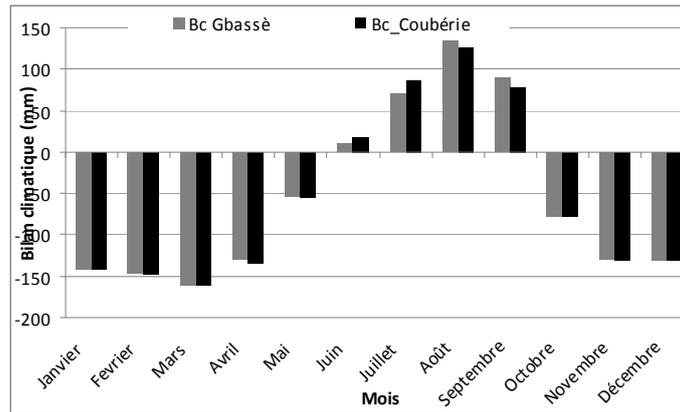


Figure 19: Bilan climatique mensuel dans les sous bassins versants

De l'analyse de cette figure, il ressort qu'au pas de temps mensuel, le bilan climatique dans les sous bassins versants de Gbassè et Coubéri permet d'identifier deux périodes opposées :

- quatre mois humides s'observent de juin à septembre, avec un maximum en août. Les rivières pendant ces mois, sont alimentées en surplus d'eau et favorisent l'alimentation des réservoirs souterrains des sous bassins versants. Cette période est aussi favorable à l'inondation causée par les fortes pluies enregistrées en août. De même, une mauvaise répartition des pluies peut être génératrice des épisodes de sécheresse très dangereuse pour l'agriculture ;
- entre octobre et mai, ce sont les mois secs où la demande évaporatoire de l'atmosphère est très importante, avec un fort amenuisement et même l'assèchement des réserves d'eau du sol.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Vissin (2007) sur le bassin versant du fleuve Niger au Bénin.

Le bilan climatique mensuel estimé entre les sous périodes (figure 20), permet de déceler des nuances dans l'évolution du bilan climatique dans les sous bassins versants.

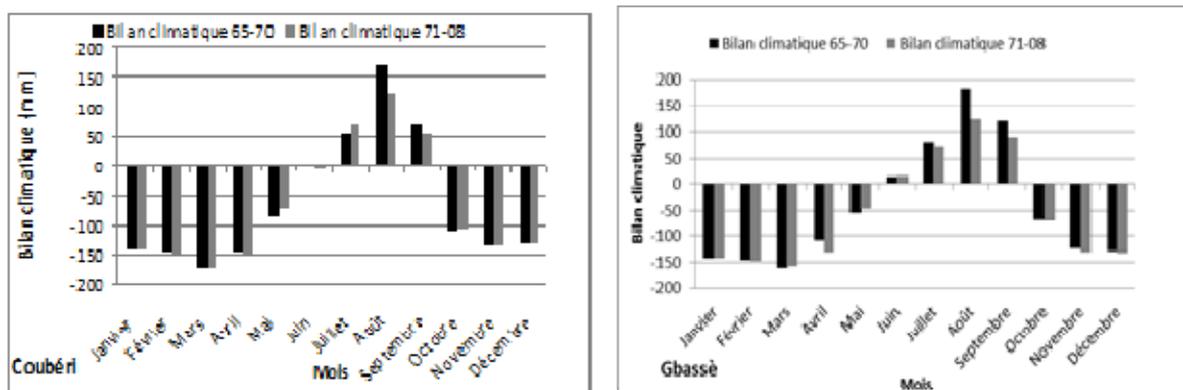


Figure 20: Variation du bilan climatique mensuel sur les sous-périodes 1960-1971 et 1971-2010

Le bilan climatique mensuel estimé dans les sous périodes, montre une baisse marquée du bilan climatique de la sous-période 1960-1971 par rapport à la sous-période 1971- 2010. Les déficits sont plus marqués dans ces sous périodes au niveau des mois les plus humides comme l'avait montré Vissin (2007) entre la période 1952 1992.

3-2-2. Evolution intra-saisonnière comparée des précipitations des sous périodes 1960-1971 et 1972-2010

3-2-2-1. Répartition inter-saisonnière dans le bassin versant de la Sota

La figure 21 montre l'évolution inter-saisonnière des hauteurs de pluies des sous périodes 1960-1971 et 1971-2010 dans le bassin versant de la Sota

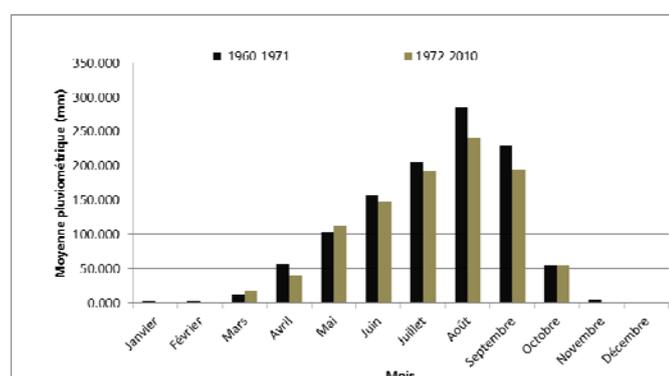


Figure 21 : Régime pluviométrique des sous périodes 1960-1971 et 1972-2010 dans la Sota

L'analyse de la figure 20 montre que la saison pluvieuse de la sous période 1960-1971 est plus arrosée que la sous période 1971-2010. Le mois le plus arrosé est le mois d'août qui enregistre une hauteur de pluie supérieure à 260 mm L'évolution inter saisonnière des deux sous périodes permet de mettre en évidence la baisse

marquée des hauteurs de pluie saisonnières sur la sous période 1971-2010. Le tableau VII permet de mieux apercevoir le déficit de la sous période 1972-2010, mais aussi la contribution des mois les plus humides et leurs déficit durant la sous période 1972-2010.

Tableau VII : Déficit entre les sous-périodes 1960-1971 et 1972-2010 des mois les plus humides dans le bassin versant de la Sota

Mois	Hauteur pluviométrique (mm)			Déficit (%)
	1960-2010	1960-1971	1972-2010	
Juin	149	153	148	-3
Juillet	196	208	192	-10
Août	251	287	239	-32
Septembre	202	224	195	-19
Total	798	872	774	-64

De l'analyse du tableau VII, il ressort que la sous-période 1972-2010 est nettement déficitaire. Les quatre mois les plus humides (juin, juillet, août et septembre) fournissent sur la période 1960 - 2010, 798 mm d'eau contre 1030 mm pour l'ensemble du bassin versant soit 77 % de la hauteur pluviométrique annuelle de la période 1960-2010. Le déficit de ces mois durant la sous-période 1972-2010 par rapport à la sous-période 1960-1971 est de - 64 %. Le mois d'août paraît marqué par le plus fort déficit pluviométrique observé dans la Sota, avec un déficit pluviométrique de plus de 32 %.

3-2-2-2.Evolution dans les sous bassins versants de la Sota

La figure 22 montre l'évolution inter-saisonnière des hauteurs de pluies des sous périodes 1960-1971 et 1971-2010 dans les sous bassins versants de la Sota à l'exutoire de Coubéri et de Gbassè.

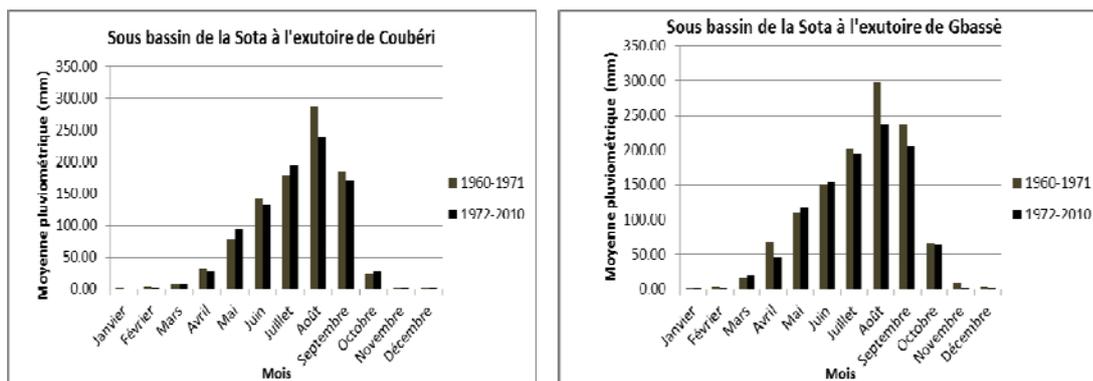


Figure 22 : Régime pluviométrique des sous périodes 1960-1971 et 1972-2010 dans les sous bassins de la Sota

L'évolution de la pluviométrie moyenne intermensuelle des deux sous-périodes indique, pour tous les sous bassins versants, une saison pluvieuse avant 1972 très importante, avec un maximum d'août supérieur à 250 mm.

3-1-3. Déficients de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota

Le déficit pluviométrique observé dans les séries pluviométriques est hétérogène d'un mois à un autre. Le tableau VIII montre le déficit pluviométrique des mois les plus humides dans les sous bassins.

Tableau VIII: Déficit pluviométrique des mois les plus humides entre les sous-périodes 1960-1971 et 1971-2010 dans les sous bassins versants de la Sota à Gbassè et de Sota à Coubéri

Hauteurs de pluies (mm) dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè					
Mois	1960-2010	1960-1971	1972-2010	Ecart	Déficit
Juin	153	151	153	2	2
juillet	196	203	195	-8	-4
Août	246	297	237	-60	-20
septembre	209	236	205	-31	-13
Total	803	886	790	-96	-11

Hauteurs de pluies (mm) dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri					
Mois	1960-2010	1960-1971	1972-2010	Ecart	Déficit
Juin	135	142	133	-9	-6
juillet	192	179	193	14	8
Août	244	287	237	-49	-17
septembre	172	186	170	-16	-9
Total	743	794	735	-60	-7

De l'examen de ces tableaux, il ressort que les quatre mois les plus pluvieux jouent un rôle important dans la péjoration pluviométrique dans le bassin versant. Dans l'ensemble, le déficit des mois les plus humides varie de 7 % dans le sous bassin versant de Coubéri et de 11 % dans le sous bassin versant de Gbassè. Le déficit le plus important est enregistré pendant le mois d'août dans les deux sous bassins versants de la Sota soit respectivement de 20 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè et 17 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Selon Bricquet et *al.* (1997), le déficit de l'apport en eau pour l'Afrique tropicale est de 16 % durant la décennie 80 contre 7 % au cours de la décennie 70. Pour l'Afrique soudano-sahélienne, ce déficit est respectivement de 27 % et 13 % pour les décennies 70 et 80 selon toujours les même auteurs.

Le tableau IX montre la contribution des mois les plus humides à la réduction le déficit global dans les sous bassins versants de la Sota

Tableau IX: Récapitulation de l'impact du déficit des mois humides sur le déficit global entre les sous-périodes 1960-1972 et 1973-2010 dans les sous bassins versants de la Sota

Gbassè	1960-2010	1960-1971	1972-2010	Ecart	Déficit
12 mois de l'année	1061 mm	1161 mm	1045 mm	-116	-11
4 mois humides	803 mm	886 mm	790 mm	-96	-12
8 mois secs	257 mm	275 mm	255 mm	-20	-8
Poids des 4 mois dans l'apport annuel (%)	76	76	76		

Coubéri	1960-2010	1960-1971	1972-2010	Ecart	Déficit
12 mois de l'année	898 mm	940 mm	891 mm	-49	-6
4 mois humides	743 mm	794 mm	735 mm	-60	-8
8 mois secs	155 mm	146 mm	156 mm	-11	-7
Poids des 4 mois dans l'apport annuel (%)	83	84	82		

L'analyse de ces tableaux, montre que les mois les plus humides contribuent énormément au cumul annuel. Le poids des mois les plus pluvieux est de 76 % à Gbassè alors qu'il varie de 82 à 84 % selon les périodes dans le sous bassin versant de Coubéri. L'écart entre les deux sous périodes est plus significatif à Gbassè (96 mm) qu'à Coubéri (60 mm). Le sous bassin versant sur lequel la contribution des mois les plus pluvieux est moindre, a connu l'écart le plus élevé.

3-1-4. Etude de la variabilité des températures dans le bassin versant de la Sota

3-1-4-1. Variabilité inter annuelle de la température

Les figures 23a et 23b, montrent l'évolution des températures minima et maxima dans le bassin versant de la Sota sur la période 1960-2010.

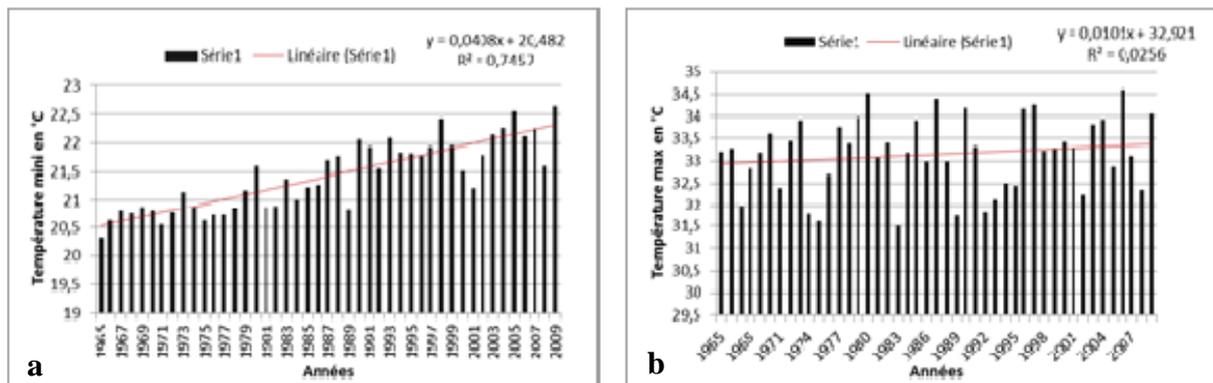


Figure 23: Evolution des températures maximales et minimales dans la Sota (1960-2010)

L'analyse de la figure permet de constater une tendance à l'augmentation des valeurs des températures sur la période de l'étude. Cela confirme par ailleurs les données du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat, GIEC (1990), sur le phénomène global du réchauffement de la planète.

L'analyse de la température de l'air révèle également des variations spatio-temporelles qui se manifestent par l'évolution des températures minima et maxima dans le bassin versant de la Sota. L'analyse montre une tendance à la hausse des valeurs de températures maximales et minimales. La tendance à la hausse est significative dans les températures minimales. Elle a connu une hausse plus importante sur la période 1971-2008. Cela confirme par ailleurs les données du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat, GIEC (2007), sur le phénomène global du réchauffement de la planète. En effet, selon le rapport de (GIEC ; 2007), des observations sur le climat, il s'avère que l'Afrique a subi une hausse des températures de l'ordre de 0,6 à 0,7 °C, plus rapide que la moyenne mondiale. En Afrique de l'Ouest, les températures ont évolué quelque peu plus rapidement que la tendance mondiale, avec des augmentations allant de 0,2°C à 0,8°C par décennie depuis la fin des années 1970 dans les zones sahélienne et soudanienne (CEDEAO-CSAO/OCDE/ CILSS, 2008). La hausse observée est toutefois plus importante sur les températures minimales (jusqu'à plus de +1°C) que

sur les maximales (jusqu'à + 0,5°C). Le réchauffement global conjugué à la variabilité accrue des précipitations et la recrudescence de phénomènes extrêmes (sécheresse, inondations) a déjà des impacts importants sur les systèmes naturels et humains. Sans mesures d'adaptation appropriées, les systèmes agro sylvo pastoraux et halieutiques seront fortement fragilisés (SARR, 2007). L'évolution des températures présente donc une structuration similaire à l'évolution l'évaporation.

La hausse des températures au sol peuvent avoir de multiples effets sur les écosystèmes (notamment sur les plantes)

La température moyenne annuelle pour la période 1960-2010 sur le bassin versant est de 27°7. Cette moyenne cache d'importantes disparités entre les températures extrêmes dont les maxima atteignent et dépassent 38°C en avril et dont les minima descendent en dessous de 16°C en décembre (15°C).

Les températures les plus élevées s'observent en mars, avril et mai (figure 5a et 5b) et les plus basses en décembre et janvier, période pendant laquelle sévit l'harmattan.

3-1-4-2. Variabilité inter mensuelle de la température

Les figures 24 et 25 montrent l'évolution de la température mensuelle maximale et minimale dans le bassin versant de la Sota de 1960 à 2010.

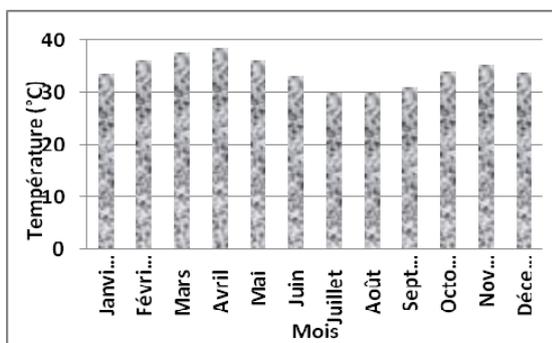


Figure 24: Rythme des températures moyennes maximales dans le bassin versant de la Sota (1960-2010)

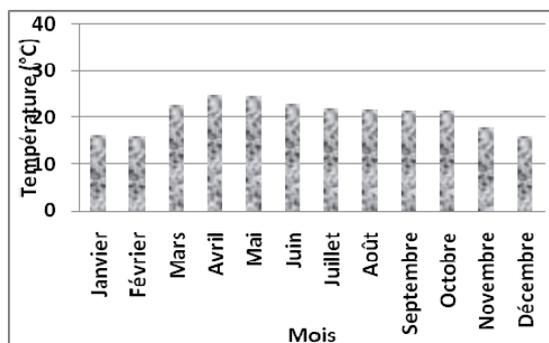


Figure 25: Rythme des températures moyennes minimales dans le bassin versant de la Sota (1960-2010)

Les températures moyennes maximales sont en général élevées sur toute l'année et varient entre 28°C et 38°C. En revanche, les minima s'étalent entre 15°C et 26°C comme l'indique les figures 24 et 25.

Les fortes valeurs correspondent à l'augmentation du rayonnement solaire dont l'action va être ensuite contrecarrée par l'arrivée des pluies, d'où la baisse des températures qui débute avec l'hivernage, et le minimum du mois d'août (29, 9°C).

La fin de la saison des pluies entraîne une augmentation de la température qui va être très rapidement contrariée par la baisse du rayonnement solaire dès novembre.

3-3. Variabilité hydrologique dans les sous bassins versants de la Sota

3-3-1. Régime hydrologique moyen dans les sous bassins versants de la Sota

Le régime hydrologique d'un cours d'eau se définit par les variations de son débit habituellement représentées par l'écoulement mensuel moyen. L'analyse de la répartition mensuelle des débits enregistrés au niveau des stations hydrométriques a permis de caractériser le régime hydrologique moyen du bassin versant de la Sota à l'exutoire de coubéri (Figure 26).

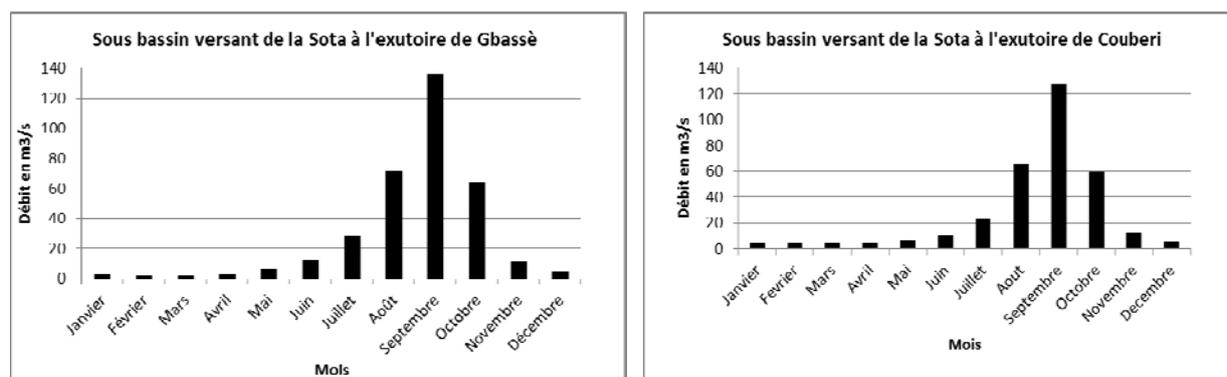


Figure 26: Régime hydrologique des sous bassins versants de la Sota

De l'analyse de la figure 26, il ressort que les rivières du bassin versant de la Sota à l'exutoire de coubéri sont caractérisées par un écoulement permanent avec un débit d'étiage évalué à 3,6 m³/s. Les cours d'eau connaissent le maximum de débit en septembre. Les hautes eaux durent trois mois (août, septembre et octobre) qui, à eux seuls, représentent 80 à 90 % de l'écoulement annuel. Cette période est caractérisée par le débordement des cours d'eau qui inondent les champs et mêmes les habitations et perturbent les activités économiques des populations. La décrue est amorcée en octobre et atteint son niveau critique en janvier sur l'ensemble des sous bassins versants. L'étiage survient en avril ou mai avec un débit généralement compris entre 3 et 6 m³/s (LE BARBE *et al.*, 1993).

3-3-1. Variation interannuelle des débits dans les sous bassins versants de la Sota

La figure 27 présente l'évolution interannuelle des débits moyens annuels dans les sous bassins versants de la Sota à Coubéri et à Gbassè sur la période 1960-2010

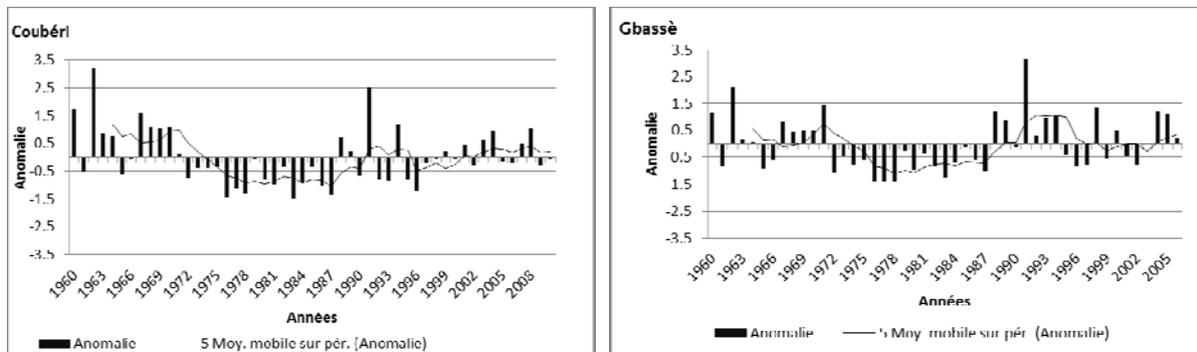


Figure 27: Variabilité interannuelle des débits annuels à Coubéri et à Gbassè

L'analyse des indices hydrométriques annuels, dans les sous bassins versants de Sota permet de dire que comme pour les séries pluviométriques annuelles, une variation importante des débits moyens annuels est observée à partir des années 1970 dans les sous bassins versants de la Sota. La variation dans les séries chronologiques des débits est généralement concomitante à celle de la pluviométrie. Une comparaison des débits annuels et des précipitations annuelles confirme pleinement la règle qui stipule que la distribution des débits dans un bassin versant soumis à un régime unique, s'ordonne suivant les mêmes lois statistiques que les distributions des précipitations du bassin versant correspondant (Dakkiche, 1993). Le phénomène est concomitant avec celui observé en pluviométrie. La baisse prolongée des précipitations a eu des incidences parfois graves sur les écoulements. Plusieurs auteurs (Olivry *et al.*, 1992 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Mahé et Olivry, 1999 ; Paturol *et al.* 1997c, Servat *et al.*, 1999 ; Mahé *et al.*, 2000 ; Laraque *et al.*, 2001 ; Vissin, 2007), présentent les mêmes bilans. La baisse du débit est confirmée par le test de Pettitt qui détecte une rupture en 1970 dans les séries chronologiques de débit au niveau des sous bassins versants.

Ainsi le test de Pettitt appliqué aux séries hydrométriques dans les sous bassins versants (figure 28) a permis de détecter des ruptures de stationnarité des débits au début de la décennie 1970 et 1971 significatives à 90 %.

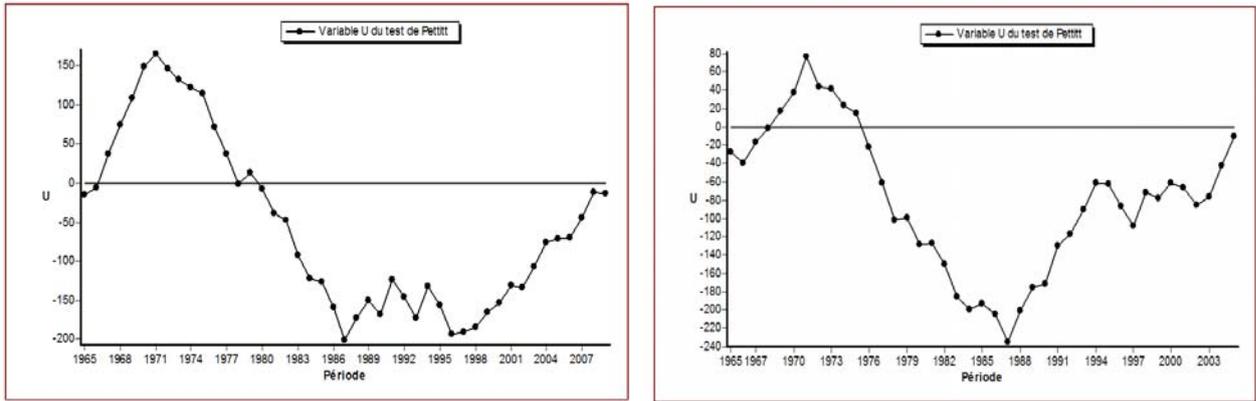


Figure 28: Rupture de stationnalité dans les débits annuels à Coubéri et à Gbassè

3-3-2. Evolution intra-saisonnière des régimes hydrologiques dans les sous bassins versants de la Sota

La figure 29 montre l'évolution intra saisonnière des écoulements dans les sous bassins versants de la Sota à l'exutoire de Coubéri et à l'exutoire de Gbassè. L'étude de l'évolution intra saisonnière des écoulements permet de mettre en évidence les variations des écoulements dans les sous bassins versants de la Sota.

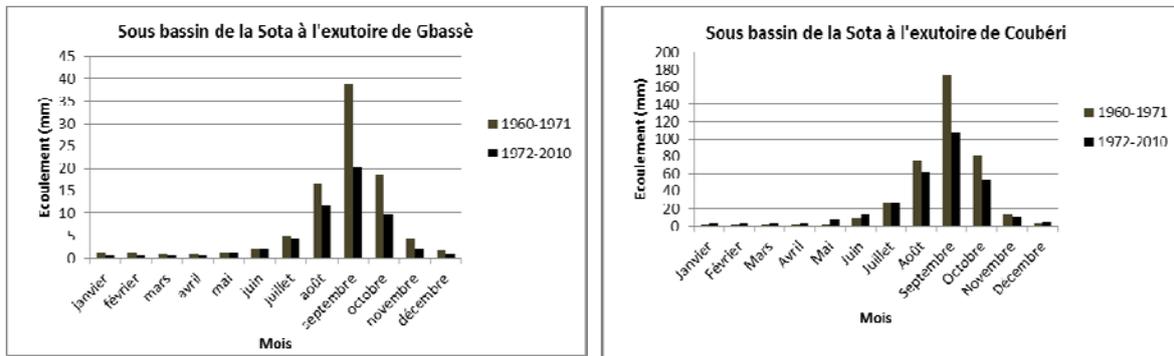


Figure 29 : Variation du régime hydrologique dans les sous bassins versant de la Sota

De l'analyse de la figure 29, il ressort les écoulements sont plus importants dans le sous bassin versant de Couberri. Ils ont considérablement baissé dans les deux sous bassin versant de la Sota à partir des années 1971. Les baisses les significatives sont intervenues au cours des mois d'août, septembre et octobre. Selon Vissin (2007) la diminution est plus forte en fin qu'en début de saison.

3-3-3. Variabilité interannuelle de l'écoulement dans les sous bassins versants de la Sota

Les figures 30 présente la variation des débits écoulés dans les sous bassins versants de la Sota à l'exutoire de Coubéri et à gbassè.

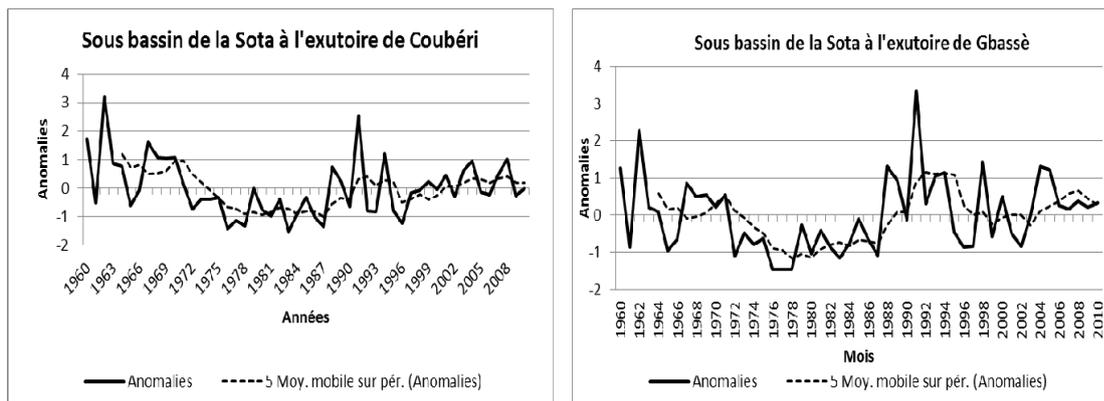


Figure 30 : Variation interannuelle de l'écoulement dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè

De l'analyse de la figure 30, il ressort que la période les écoulements les plus élevés ont été obtenus en 1960, 1962, 1967, 1968, 1993 dans les deux sous bassins versants de la Sota. Ces années correspondent aux années ayant enregistré de forte pluies. Des années de grands déficits d'écoulement enregistrés dans les deux sous bassins versants sont 1972, 1977, 1976, 1978, 1983, 1987. De façon global la période 1960-1971 est excédentaire et la période 1972-1990 est par contre déficitaire. Le tableau X, traduit l'écart entre les débits des deux sous périodes 1965-1970 et 1971-2006.

Tableau X : Déficit des débits écoulés entre les sous-périodes 1965-1970 et 1971-2006 dans les sous bassins versants de la Sota

Sous bassin versant	Débits annuels (m ³ /s)		
	1960-1971	1972-2006	Ecart
Gbassè	341,05	297,27	-43,78
Coubéri	447,34	275,40	-171,93

L'analyse du tableau montre un écart significatif entre les deux sous périodes. Selon Vissin (2007), le test de Student réalisé sur les moyennes des sous-séries met en évidence leur différence significative au seuil de 95 % quel que soit le sous bassin versant. On peut conclure que le bassin versant de la Sota est confronté à une baisse significative de son débit. Cette baisse enregistrée a été aussi mise en évidence par Vissin (2007) sur le bassin versant du Niger au Bénin.

3-4. Bilan hydrologique du bassin versant de la Sota

La figure 31 présente l'évolution du bilan hydrologique dans les sous bassins versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri et de Gbassè.

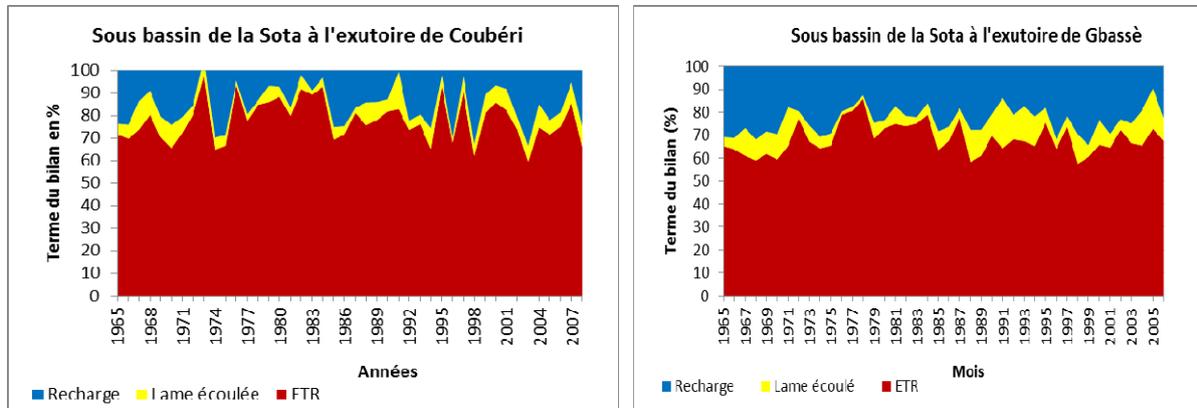


Figure 31: Evolution des termes du bilan hydrologique dans les sous bassins versants de Coubéri et de Gbassè

De l'analyse de la figure 31, on note que pour une hauteur de pluie de 100 % reçue dans les sous bassins versants, on relève 97 % à 86 % pour l'évaporation, 28 % à 29 % pour la recharge et 7 à 16 % pour l'écoulement. Il y a donc d'énormes pertes par évaporation évaluées à presque 85 % des précipitations dans les sous bassins versants. Le sous bassin versant de la Sota à Coubéri enregistre plus d'écoulement et plus importante recharge que le sous bassin versant de la Sota à Gbassè.

3-5. Incidence des fluctuations pluviométriques sur les termes du bilan

Le tableau XI présente la synthèse de la comparaison des hauteurs de pluies aux autres termes du bilan hydrologique (Ecoulement, évaporation et la recharge) dans les sous bassins versant de la Sota à Coubéri et à Gbassè

Tableau XI: Etude comparative des différents termes du bilan hydrologique

		Sota à Gbassè	Sota à Couberi
Pluie	1960-2010	1081	44
	1960-1971	1189	1005
	1972-2010	1048	928
	Ecart	-141	-77
	Déficit (%)	-12	-8
Evaporation	1960-2010	814	745
	1960-1971	898	779
	1972-2010	789	735
	Ecart	-109	-44
	Déficit (%)	-12.	-6
Écoulement	1960-2010	82	51
	1960-1971	120	58
	1972-2010	70	49
	Ecart	-50	-9
	Déficit (%)	-41	-16
Recharge	1960-2010	185	147
	1960-1971	188	168
	1972-2010	177	140
	Ecart	-17	-28
	Déficit (%)	-6	-17

De l'analyse du tableau XI, il ressort que le déficit pluviométrique observé dans les sous bassins versants entre les périodes 1960-1971 et 1972-2010 est de 12 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè et 8 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Quant aux déficits d'écoulement, ils sont respectivement de entre les deux périodes sont respectivement de 41 % dans la Sota à Gbassè et 16 % dans la Sota à Coubéri. De même, la baisse de la pluviométrie entre les deux périodes a évidemment aussi des répercussions fortes sur la recharge des sous bassins versants. Le déficit de la recharge entre les deux périodes est de 10 % pour la Sota à Gbassè et -17 % pour la Sota à Coubéri. Ainsi, comme l'avait affirmé Vissin (2007), les déficits pluviométriques observés au cours des décennies 1970 et 1980 ont considérablement impacté les autres termes du bilan hydrologique sur l'ensemble des deux sous bassins versants. Ainsi, à un déficit pluviométrique de 12 % et 8% dans les sous bassins versants de la Sota à l'exutoire de Gbassè et de Coubéri correspondent respectivement un deficit d'écoulement de 41 % et 16 % dans les sous bassins versants.

3.6- Evolution des débits maximaux dans les sous bassins versant de la Sota

L'étude des débits maximaux permet de connaître les débits provocateurs des crues et inondations dans le bassin versant ces dernières années dans le bassin versant. La figure 32 montre l'évolution des débits maximaux dans les sous bassins versant de la Sota à Couberi et à Gbassè.

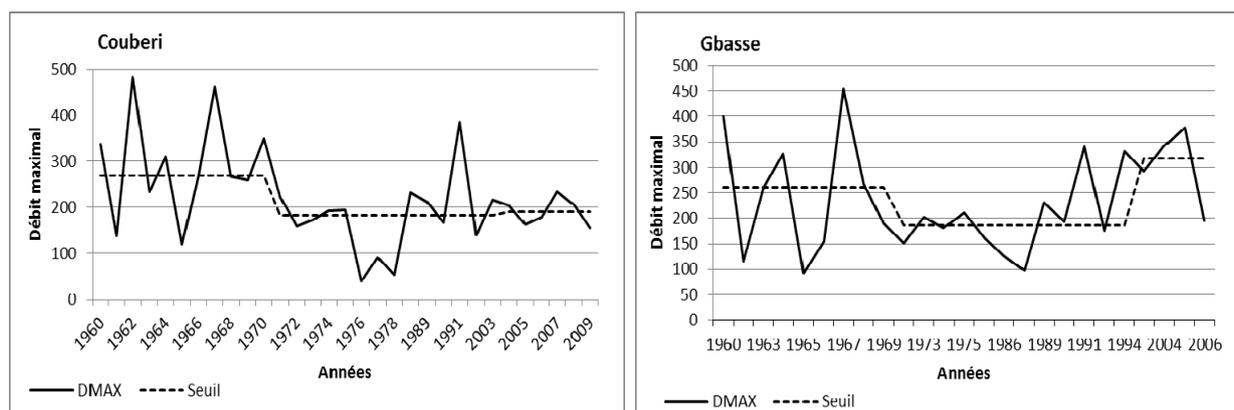


Figure 32: Evolution des débits maximaux à Couberi et à Gbassè de 1960-2009

De l'analyse de la figure 32, il ressort que les débits de pointe dans les sous bassins versants varient de 39,30 et 483,5 m³ à Couberi et de 92,3 et 453,6 m³ à Gbassè. Les débits de pointe permettent l'étude des crues et de mettre en lumière la réaction du bassin versant une séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou réponse du bassin versant en fonction des caractères propres des précipitations (hauteur, intensité, durée totale et durée efficace) est déterminée par la combinaison complexe des divers éléments caractérisant l'organisme fluvial : Etat de saturation du sol, importance des pentes, densité de drainage, taux de couverture végétale, forme du bassin versant,...etc. (Fares, 2012).

Dans le bassin versant de la Sota, les débits maximaux s'installent entre les mois d'août, septembre et octobre. Il est le résultat des pluies intenses. Les débits de pointe présentent près de 80 % de flux annuel du bassin versant. Les années extrêmes enregistrées sont 1960, 1962, 1967, 1978, 1989, 1991, 2007 dans le sous bassin versant de la Sota à Couberi. Dans le sous bassin versant de la Sota à Gbassè les années extrêmes sont 1960, 1964, 1967, 1973, 1975, 1987, 1991, 1994. Ces débits se manifestent souvent par d'importantes inondations qu'affrontent populations avec les moyens dont elles disposent. Les estimations des débits des

crues maximales ont été toujours perçues comme une nécessité impérieuse, pour se protéger contre les séquences néfastes.

3-7. Discussion

L'analyse des données pluviométriques dans le bassin versant de la Sota a permis de mettre en évidence la tendance générale à la baisse de la pluviométrie à partir de la décennie 1970 qui s'est accentuée au cours des décennies suivantes. Ce résultat confirme celui obtenu par Vissin, (2007), qui avait montré une baisse sensible des indices pluviométriques dans l'ensemble du bassin versant béninois du fleuve Niger. De même, Houndenou et Hernandez (1998) ont montré que la région de l'Atakora est confrontée à une diminution généralisée des hauteurs de pluie sur la période 1961-1990 qui a débuté à partir de 1963-1964 et est devenue persistante après 1968. Pour ces auteurs, la baisse de la pluviométrie après 1970 n'est due en partie qu'à une diminution du nombre d'évènements pluvieux pendant la saison des pluies. D'autres auteurs ont également mis en évidence cette diminution des hauteurs de pluie dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations de la sous-région de l'Afrique de l'Ouest (Olivry, 1974 ; Sircoulon, 1976 ; Hubert et *al.*, 1989; Mahé & Olivier, 1995 ; Paturel *et al.*, 1996 ; Servat *et al.*, 1999) et particulièrement au Bénin (Boko, 1975 et 1988a ; Bokonon-Ganta, 1987 ; Houndénou, 1992 et 1999 ; Vissin , 2007 ; Amoussou, 2010, Totin 2010). L'évolution des séries pluviométriques est marquée par les ruptures de stationnarité dont la plus importante est située au début des années 1970 dans le bassin versant. Ces ruptures ont été aussi identifiées par Vissin (2007) dans le bassin versant béninois du fleuve Niger, Amoussou (2010) dans le bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo et par d'autres auteurs en Afrique de l'ouest (1969 (Hubert et *al.*, 1987, 1989 ; Lubès et *al.*, 1994 ; Servat, 1994 ; Ardoin, 2004). La baisse pluviométrique n'affecte pas tous les mois de l'année de la même manière. Les mois les plus humides qui contribuent à eux seuls à 77 % du cumul pluviométrique annuel sont les plus affectés par la récession pluviométrique avec un déficit de -64 % sur l'ensemble du bassin versant de la Sota. Ce déficit pluviométrique varie dans les sous bassins versant de la Sota. Il est de 11% dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè contre 7 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Vissin (2007) avait estimé ces déficits à respectivement 15 % dans le sous bassin versant de la Sota à

l'exutoire de Gbassè contre 16 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri.

La variabilité pluviométrique se manifeste par une baisse des écoulements dans les sous bassins versants de la Sota. Elle s'est traduite par une baisse de 41 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè contre 16 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri contre respectivement -66 % et 52 % obtenus par Vissin (2007) dans le bassin versant béninois du fleuve Niger. Cette baisse des écoulements enregistrée a été mise en évidence par plusieurs auteurs en Afrique tropicale (Courel, 1988 ; Olivry, 1993 ; Mahe et Olivry, 1995 ; Afouda et Adisso, 1997 ; Parturel *et al.*, 1997 ; Vissin, 2001 ; Vissin *et al.*, 2003 ; Houssou *et al.*, 2004 ; Vissin *et al.*, 2006). De nombreuses études ont montré le lien étroite entre la variabilité pluviométrique et la variabilité des écoulements (Parturel *et al.*, 1997 ; Mahé *et al.*, 2005). Les écoulements des grands fleuves varient de façon concomitante avec les précipitations, mais de façon non linéaire, puisque la diminution relative des écoulements est plus importante que celle des pluies. Le déficit pluviométrique d'environ 10 à 30 % observé depuis les années 1970 a ainsi entraîné une baisse de plus de 40 % des débits des grands fleuves (Parturel *et al.*, 2003).

Le bassin versant de la Sota est marqué par une tendance générale à la baisse de la pluviométrie pendant la période 1960 et 2010. Il s'ensuit une tendance à la hausse des températures minimales et maximales sur la même période. Les déficits pluviométriques ont été largement amplifiés dans les écoulements de tous les sous bassins versant. Cette diminution a été aussi observée dans la recharge au niveau des sous bassins versant. Elle est plus accentuée dans le sous bassin versant de la Sota à Couberi qu'à Gbassè. A cette dynamique hydroclimatique dans le bassin versant s'ajoute la récurrence des phénomènes hydroclimatiques extrêmes, responsables des risques dans le bassin versant. Quelle est l'influence des risques hydroclimatiques sur les modes et moyens d'existences des populations vivant sur le bassin versant?

CHAPITRE IV:

ANALYSE DE L'INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Les risques hydroclimatiques sont des phénomènes naturels violents ou extrêmes, d'origine météorologique ou climatique, qui peuvent se déclencher en n'importe quel point de la planète. Ils constituent des événements ponctuels (les tornades, les inondations, les sécheresses), généralement associés à des conséquences négatives qui peuvent se manifester sous la forme d'un désastre (Baudoin, 2012). Ce chapitre est consacré à l'analyse des risques hydroclimatiques dans le bassin versant et à la détermination de l'influence de ces risques sur les écosystèmes dans le bassin versant.

4-1. Analyse des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Des études réalisées par IFRC (1999) et MESSANH en (2000), il ressort que l'Afrique demeure le continent le plus vulnérable aux risques naturels. En effet, mis à part les épidémies, l'Afrique enregistre environ trente pour cent (30 %) des risques naturels produits dans le monde. Les pays d'Afrique de l'ouest sont très vulnérables aux catastrophes hydro-climatiques (sécheresse et inondations). Au Bénin, selon les différentes études réalisées particulièrement dans le cadre du PANA-Bénin (2008), les principaux phénomènes extrêmes d'origine hydrométéorologique sont les inondations, les épisodes de sécheresse, les pluies tardives et violentes, les chaleurs excessives. Parmi ces risques, les inondations et la sécheresse constituent des risques hydroclimatiques majeurs dans le bassin versant.

4-1-1. Analyse de risque d'inondation

L'analyse du risque d'inondation consiste à déterminer l'aléa d'inondation et à cartographier les zones à risque d'inondation dans le bassin versant de la Sota

4-1-1. Détermination de l'aléa d'inondation dans le bassin versant de la Sota

Dans le contexte de l'étude des risques, l'aléa se définit comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène. Il dépend de l'intensité du phénomène et de son occurrence, mais aussi de la durée considérée et de l'espace pris en compte (Bouchir, 2007). Pour Beck cité par Peltier (2012) la détermination de l'aléa se fait

suyant trois critères : une magnitude (composante énergétique), une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale).

4-1-1-1. Caractérisation de l'aléa hydrologique

La caractérisation de l'aléa hydrométéorologique se fait selon Fouchier (2010) par la détermination de sa probabilité d'occurrence temporelle (estimée par la période de retour) et spatiale (influencée par la climatologie mais également par la topographie, l'occupation du sol et la pédologie qui contrôlent la susceptibilité des territoires à l'inondation) ;

- son intensité, mesurée par la pluie maximale sur une certaine durée, par le débit maximal atteint dans le cours d'eau ;

- sa durée (durée des précipitations, durée de la crue).

Puisque c'est seulement le risque d'inondation pluvial et fluvial qui sont pris en compte, c'est seulement l'aléa hydrologique et pluviométrique qui sont étudiés.

4-1-1-1-1. Fréquence des débits maximaux dans les sous bassins versants de la Sota

La figure 33 traduit un ajustement des séries hydrologiques par la loi de distribution de Gumbel sur la période 1960-2010).

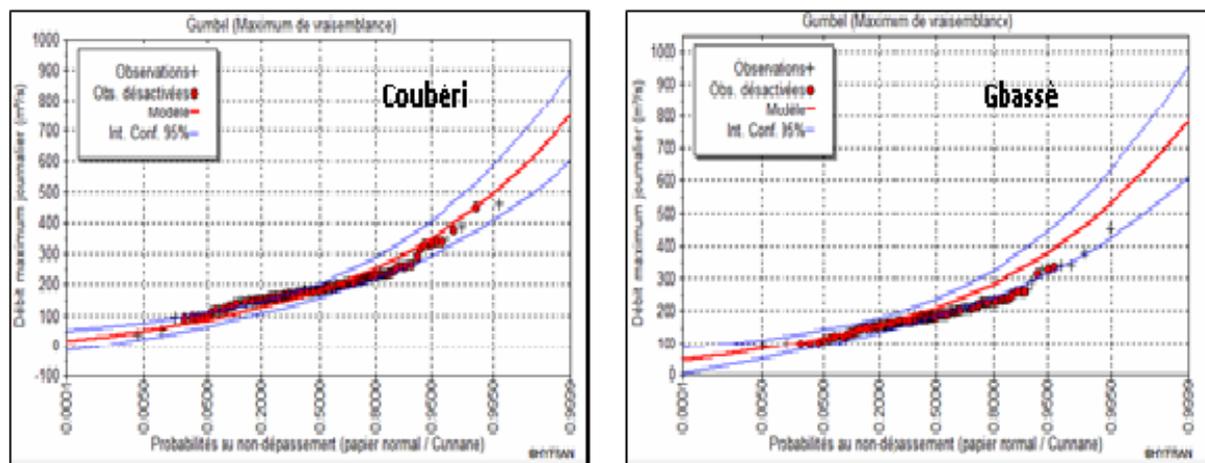


Figure 33: Ajustement de la loi de Gumbel au débit maximal à Coubéri et à Gbassè

L'analyse de la figure 33 permet de déduire que l'ajustement est dans son ensemble satisfaisant car la droite d'équation passe par les points expérimentaux. La loi de Gumbel peut éventuellement être utilisée pour estimer les probabilités d'occurrence des crues et leurs périodes de retour.

Pour vérifier la fiabilité des résultats, l'application des tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité s'avère nécessaire. Ainsi, les débits de pointe ont été soumis à ces différents tests statistiques (tableau XII)

Tableau XII: Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux de la Sota

Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P(0,05)	K	P(0,05)	W	P(0,05)
Coubéri	2,51	0,012	0,173	0,862	1,36	0,172
Gbassè	1,35	0,178	1,39	0,163	1,50	0,133

Source: traitement des données

L'analyse des données du tableau XII, permet de constater que, les débits de pointe sur les deux sous bassins versants sont indépendants, stationnaires et homogènes.

A partir de l'équation de la droite de Gumbel, les quantiles des débits maximaux ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau XIII).

Tableau XIII: Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de Gumbel

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Coubéri	212 [186-238]	285 [244-325]	333 [281-385]	380 [316- 444]	440 [360-519]	485 [393- 633]	529 [425-633]
Gbassè	181 [159-204]	254 [219-289]	302 [257-347]	348 [293- 404]	408 [339- 477]	453 [373-532]	497 [407- 587]

Source: traitement des données

L'analyse fréquentielle des débits journaliers maximums annuels permet d'estimer les débits de crue ayant une probabilité de subvenir dans le bassin versant. Ainsi, les débits de crue ayant une probabilité sur deux de subvenir dans le sous bassin versant de la sota à l'exutoire de Gbassè ont une valeur comprise entre 159 et 204 m³/s et entre 186 et 238 m³/s dans le sous de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Puisque le débit moyen annuel dans les deux sous bassins versants est de 30 m³/s dans la Sota à l'exutoire de Gbassè et de 87 m³/s dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri, on peut donc dire que les débits de crues fréquentes (2 ans) et décennales (10 ans) sont à l'origine des inondations de plus en plus fréquentes

observées dans le bassin versant. Dans la même logique les débits de crue rare (période de retour supérieur ou égale à 50 ans) se situent entre 360 et 519 m³/s dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri et entre 339- 477 dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè.

4-1-1-1-2. Intensité des débits maximaux journaliers

L'analyse de l'intensité des débits maximaux dans le bassin versant a été faite par l'élaboration des courbes débits durée fréquence (QdF) dans les sous bassins versants. Ainsi la figure 34, traduit l'évolution de courbes débits durée fréquence dans les sous bassins versant de la Sota à Coubéri et à Gbassè.

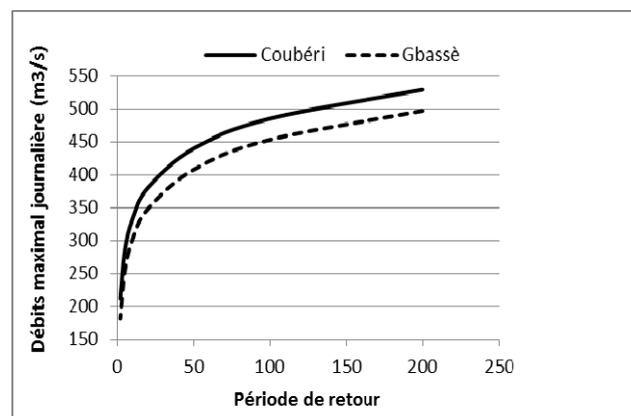


Figure 34: Courbes QdF des sous bassins versants de Coubéri et de Gbassè

Les courbes QdF (au pas de temps journalier) décrivent les intensités des débits de durées de 24 h qui peuvent survenir dans le bassin versant. Les courbes montrent les temps de retour de 2, 5, 10, 20, 100, 200 ans. Le quantile des débits maximaux journaliers de temps de retour de deux ans indique 212 m³/s à Gbassè et 181 m³/s à Coubéri, alors que le débit moyen annuel dans les sous bassin versant de Gbassè et de Coubéri est respectivement de 87 m³/s et 29 m³/s, les quantiles de période de retour de 2 ans sont suffisamment supérieurs à cette moyenne et donc peuvent engendrer des crues, causes des inondations dans le bassin versant.

4-1-1-2. Caractérisation de l'aléa pluviométrique

4-1-1-2-1. Fréquence des pluies maximales journalières dans le bassin versant de la Sota

Pour l'aléa pluviométrique, les précipitations maximales, représentent le premier facteur déclenchant des mécanismes de crue et d'inondation.

Après l'application des lois d'ajustement sur les hauteurs de pluies maximales, seule la loi de Gumbel s'adapte le mieux aux pluies maximales journalières. Plusieurs méthodes existent pour ajuster les distributions statistiques aux échantillons. La méthode maximum de vraisemblance a été utilisée dans la présente étude pour ajuster les séries aux lois retenues

La figure 35, illustre un ajustement des séries pluviométriques par la loi de Gumbel et la loi log-Pearson Type III sur la période 1960-2010.

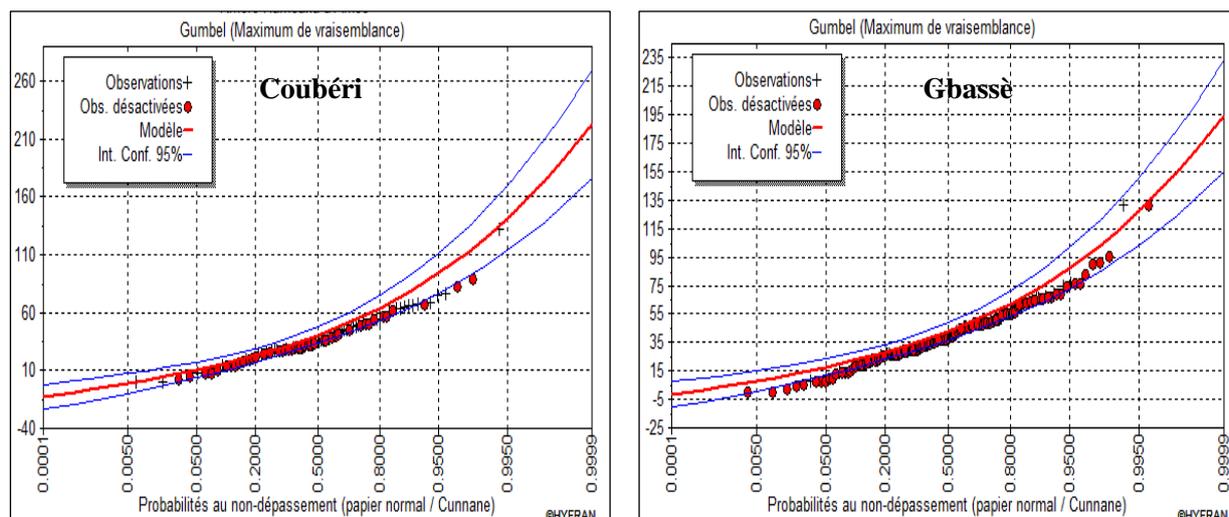


Figure 35: Ajustement de la loi de Gumbel sur les sous bassins versants de la Sota

De l'analyse des figures 35, il ressort que toutes les séries pluviométriques s'ajustent bien aux lois de Gumbel avec une marge d'erreur de 5 %.

Conformément à la méthodologie de l'analyse fréquentielle, il faut assurer l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité de la série (Meylan ; Musy, 1999). Ainsi, les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ont été vérifiées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz (Wald et Wolfowitz, 1943). Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945) et de Kendal (Kendal, 1975).

Tableau XIV: Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux de la Sota

Stations	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P (0,05)	K	P(0,05)	W	P(0,05)
Stations pluviométriques						
Coubéri	0,53	0,531	0,769	0,442	0,44	0,659
Gbassè	0,29	0,771	0,607	0,54	0,479	0,632

Source : traitement des données

Il résulte de l'analyse des résultats de ce tableau que, les séries pluviométriques maximales journalières sont indépendantes, homogènes et stationnaires sur les sous bassins versants de la Sota.

L'ajustement des pluies journalières aux tests statistiques a permis d'obtenir les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans). Les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée aux estimations sont aussi estimés (tableau XV).

Tableau XV: Quantiles estimés dans les sous bassins versants de la Sota

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Gbassè	52 [45- 58]	72 [63- 82]	86 [73- 98]	99 [84- 114]	116 [97- 135]	128 [106- 150]	141 [116- 166]
Coubéri	39 [33- 45]	58 [49- 69]	71 [58- 84]	83 [66- 100]	98 [76- 120]	109 [83- 136]	120 [90- 151]

Source: traitement des données

De l'analyse du tableau XV, il ressort que les hauteurs de pluie journalière de 39 à 52 mm ont une probabilité sur deux de se produire tous les deux ans sur le bassin versant. De même, celles qui ont une chance sur dix de se produire varie entre 71 mm à Coubéri contre 86 mm à Gbassè. Les précipitations exceptionnelles dans le bassin versant sont celles dont les valeurs sont supérieures à 86 mm c'est-à-dire celles dont les périodes de retour sont supérieures à 10 ans.

4-1-1-2-2. Intensité des pluies maximales dans le bassin versant

Pour analyser l'intensité des séries maximales sur le bassin versant, la loi Pearson 3 a été ajustée à chacune des séries de maximales journalières. La figure 36, montre la courbe intensité-durée-fréquence qui en découle.

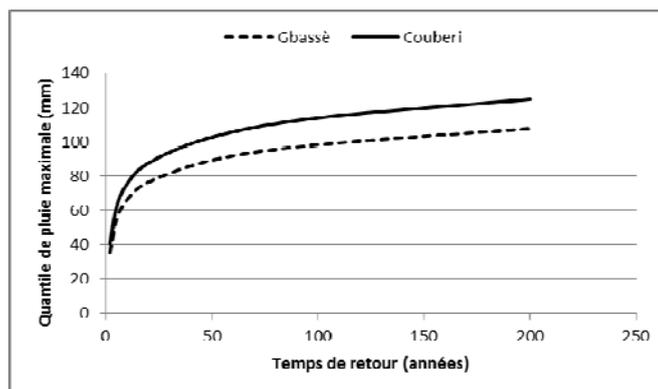


Figure 36: Courbes Intensité -Durée-Fréquence dans les stations de la Sota

Les courbes IDF (au pas de temps annuel) décrivent les intensités des pluies de différentes durées qui peuvent survenir dans le bassin versant. Ces courbes montrent les temps de retour de 2, 5, 10, 20, 100, 200 ans. L'allure des courbes obtenues pour les différentes stations ne diffèrent pas beaucoup. Ce qui traduit que les données traitées sont homogènes dans leur globalité. Le quantile des précipitations maximales journalières de temps de retour de deux ans varie de 39 à 52 mm. Une pluie est d'autant plus intense que sa récurrence est grande (Musy et Higy, 2004). Les pluies exceptionnelles engendrant donc des événements exceptionnels correspondant à une précipitation maximale moyenne supérieure à 73 mm.

4-1-1-3. Durée des événements hydropluviométriques dans le bassin versant

La figure 37, traduit l'évolution du nombre des jours de pluie sur les différentes stations du bassin versant de la Sota de 1960 -2010

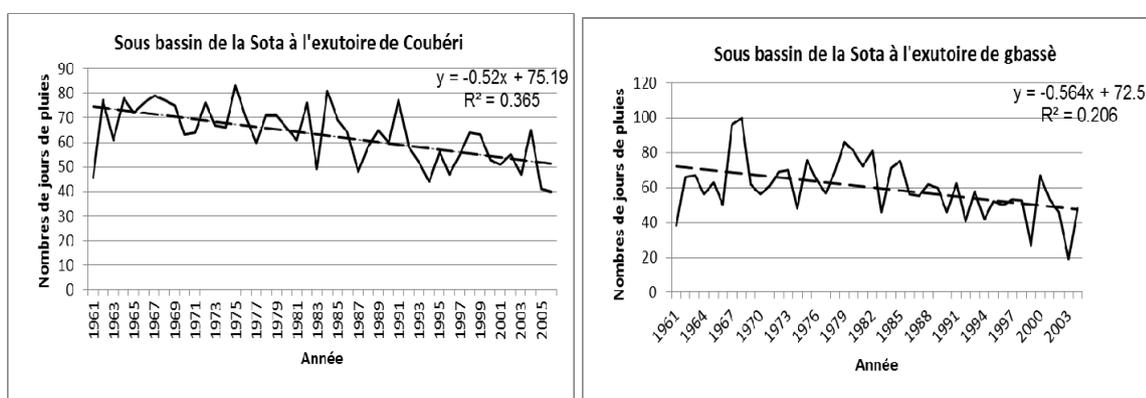


Figure 37: Nombre de jours de pluie dans les sous bassin versant de la Sota de 1960-2010

Du point de vue climatologique, l'étude des jours pluvieux peut contribuer à améliorer nos connaissances sur les aspects des déficits pluviométriques saisonniers et

annuels ainsi que sur les changements susceptibles d'affecter l'évolution des précipitations (Kouassi *et al.*, 2010). L'étude de la variabilité du nombre annuel de jours de pluie a été très peu abordée au cours des travaux antérieurs (Servat *et al.*, 1998). Dans le bassin versant de la Sota, il ressort de l'analyse de la figure 36, qu'il y a eu une tendance générale à la baisse du nombre de jours sur l'ensemble des sous bassins versants de la Sota. Les baisses les plus significatives sont enregistrées au niveau du sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè. La diminution du nombre de jours de pluie traduit ainsi la réduction du nombre des évènements pluvieux sur l'ensemble du bassin versant de la Sota.

4-1-2. Caractérisation de la sécheresse

Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (OMM, 2010). Différents types de sécheresse sont classiquement identifiés et peuvent être évalués sur différentes profondeurs temporelles selon les domaines d'application. On distingue classiquement 3 types de sécheresse : les sécheresses météorologiques liées à un déficit du cumul de précipitations, les sécheresses agricoles ou édaphiques concernant l'humidité moyenne des sols et les sécheresses hydrologiques liées aux débits des cours d'eau ou au niveau des nappes. L'analyse de la sécheresse revient en fait, à la prise en considération de sa durée ainsi que de sa sévérité, de son intensité et de son extension spatiale (Sibou, 2005).

4-1-2.-1. Caractérisation de la sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique est liée à un déficit du cumul de précipitations. Ce type de sécheresse se traduit par une absence prolongée, un déficit marqué ou une faible distribution des précipitations durant une période donnée et ce, par rapport à la moyenne des précipitations calculée par référence à la normale climatique (une période supérieure ou égale à 30 ans). En d'autres termes, la sécheresse météorologique est l'expression de la déviation de la précipitation, pendant une durée donnée, par rapport à la normale (Keyantash et Dracup, 2002 ; Boken 2005).

Pour caractériser la sécheresse météorologique ; les seuils annuels ont été déterminés par la méthode des écarts types. Les seuils qui indiquent la sécheresse météorologique annuelle dans le bassin versant de la Sota sont estimés en

appliquant la méthode d'intervalle de confiance ; l'écart à la normale et du rapport à la normale aux séries pluviométriques (Tableau XVI).

Tableau XVI: Seuils de sécheresse correspondants aux différents indices au cours de la période 1960-2010

Sous bassin versant	Seuil de la sécheresse (Li de l'IC) (mm)	Ecart à la normale (%)	Rapport à la normale (%)
Coubéri	795,18	-1,93	98,07
Gbassè	1059,59	-1,50	98,50

Source : Traitement des données

L'analyse de ce tableau XVI, permet de constater que, les seuils varient en fonction des méthodes considérées. Par exemple la méthode de l'intervalle de confiance, les seuils calculés oscillent entre 795,18 mm dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri et 1059,59 mm dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè. Ils ont permis de déterminer les seuils relatifs aux indices de l'écart à la normale et du rapport à la normale. Les années ayant le cumul pluviométrique annuel supérieur au seuil définis en dessous de ce seuil est considéré comme sèche. Dans la même logique, les années dont les valeurs sont dessus sont considérées comme humides. En utilisant les seuils de sécheresse, on a pu déterminer pour chacun des sous bassins versants étudiées les fréquences des années sèches normales et humides durant la période étudiée au niveau des huit stations (tableau XVI).

Tableau XVII: Fréquence des années sèches 1960-2010

Sous bassin versant	Coubéri	Gbassè
Années sèches (%)	40,9	47,7

De l'analyse de ce tableau, il ressort que, le taux d'années sèches varie de 41% à 48 % sur l'ensemble du bassin versant. Le taux moyen de la sécheresse oscille autour de 45 % sur la période de 1960 à 2010. Afin de faire une analyse ponctuelle au niveau des postes pluviométriques retenus dans cette étude, et pour mieux évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, nous avons calculé les indices SPI. Afin de mieux caractériser le niveau de sévérité des sécheresses vécues, les fréquences des années sèches ont été calculées à partir des valeurs de l'indice standardisé de précipitations pour différentes stations au cours de la période d'étude (tableau XVIII)

Tableau XVIII: Fréquence de différentes classes de la sécheresse au cours de la période 1965-2008

Sous bassins versants	Sécheresse Modérée (%)	Sécheresse Forte (%)	Sécheresse Extrême (%)
Coubéri	48	5	5
Gbassè	36	14	2

Il résulte de l'analyse de ce tableau que, la fréquence des sécheresses modérées varie entre 36 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè et 48 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Celle des sécheresses modérées oscille 5 % dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri et 14% à dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè. La sécheresse extrême sur la période 1960 -2010 frappée plus le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri que le sous bassin versant de Sota à Gbassè.

Sur l'ensemble du bassin versant, les sécheresses les plus sévères survenues au cours de la période 1960 à 2010 sont formées de trois, quatre et cinq années sèches consécutives L'analyse de différentes sécheresses au niveau des sous bassins versants permet de confirmer une fois de plus, l'assèchement accru du bassin versant tel que souligné par les populations lors de nos travaux de terrain. En effet, avant 1970, les sécheresses étaient peu fréquentes et touchaient rarement l'ensemble du bassin versant. Après 1970, on a eu de plus en plus de sécheresses touchant souvent plus de la moitié du bassin versant.

Quel est l'impact de ces épisodes de sécheresses sur les eaux souterraines, et les rivières dans le bassin versant? Pour approche de solution à cette question, nous avons caractérisé la sécheresse hydrologique.

4-1-2.-2. Sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est définie comme, l'écart de l'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine par rapport à certaines conditions moyennes à différents moments (Sibou, 2005). Comme dans le cas de la sécheresse de type agricole, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur de précipitations et le degré d'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine des lacs, réservoirs, aquifères et cours d'eau, parce que , ces divers éléments sont utilisés à des fins multiples (OMM , 2006).

Pour caractériser la sécheresse hydrologique dans les sous bassins versants, les seuils ont été calculés sur les débits caractéristiques minimaux. Le seuil choisi ici est la limite inférieure des séries de débits minimaux. Il a permis d'estimer les années hydrologiquement sèches, c'est-à-dire les années dont les débits sont en dessous de la limite inférieure (Figure 38) sur les sous bassins versants. Contrairement à la sécheresse météorologique, ici, seule la méthode de seuil de la limite inférieure a été appliquée.

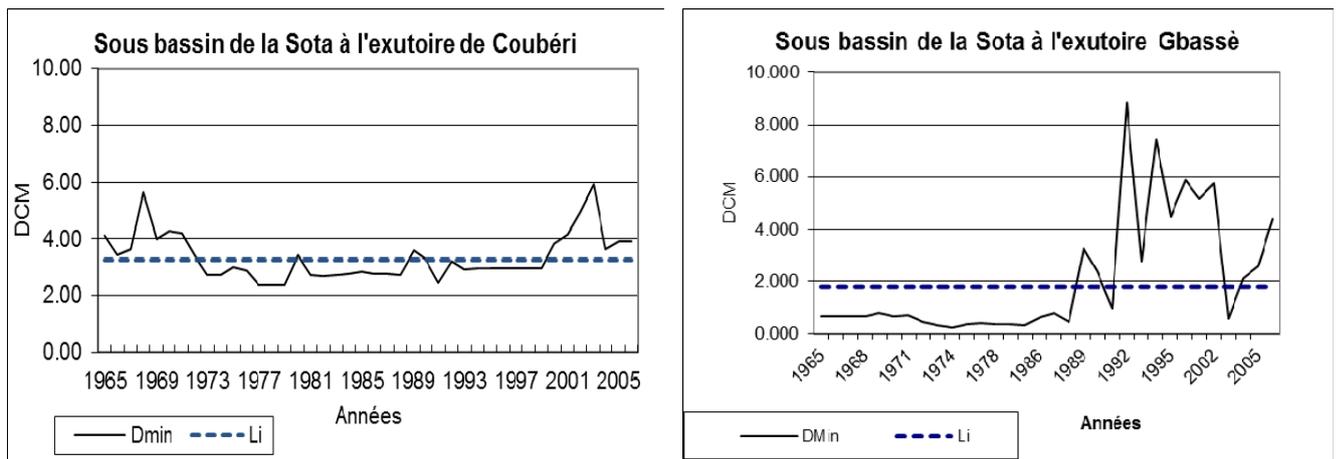


Figure 38 : débits d'étiage à Couberri et à gbassè

De l'analyse de ces figures, on peut déduire que le sous bassin versant de la Sota à Gbassè a connu plus d'années hydrologiquement sèches que le sous bassin versant de la Sota à Coubéri. Le sous bassin versant de Gbassè a connu une longue période de sécheresse qui s'étend de 1960 à 1990. Dans le sous bassin versant de Coubéri, la sécheresse a duré de 1971 à 1996 avec quelques années humides intermédiaires.

4-2. Facteurs de vulnérabilité du bassin versant aux risques hydroclimatiques

La vulnérabilité des populations constitue l'impact le plus négatif des risques hydroclimatiques. Dans le bassin versant de la Sota, les écosystèmes sont affectés par un processus généralisé de dégradation qui l'expose aux aléas hydroclimatiques. La dégradation des écosystèmes est particulièrement remarquable dans les zones agricoles et autour des grandes agglomérations. Les figures 39 a, b c, montrent la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota.

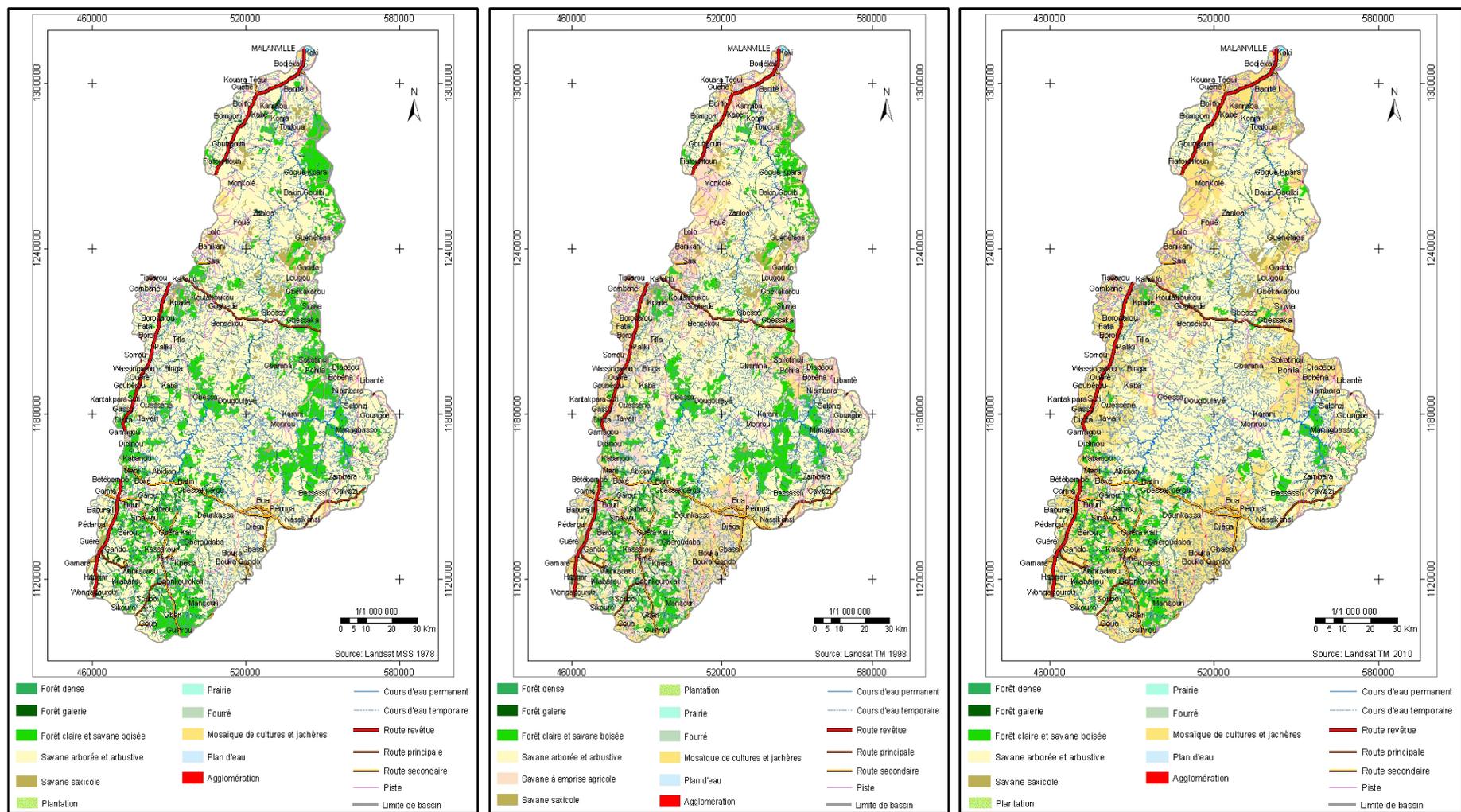


Figure 39 : Occupation des sols dans le bassin versant de la Sota en 1978 ; 1998 ; 2010

Le tableau XIX présente la synthèse de l'évolution de la superficie des différentes unités d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota de 1978-2010.

Tableau XX : Evolution de la superficie des différentes unités d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota de 1978-2010

Unités d'occupation du sol	Sup_1978 (Ha)	Sup_1998 (Ha)	sup_2010 (Ha)
Forêt claire et Savane boisée	237873	181420	83278
Mosaïque de cultures et jachères	26943	211932	602234
Savane arborée et savane arbustive	1003411	635701	589006
Forêt galerie	43321	39630	33808
Forêt dense	4019	3015	1726
Savane saxicole	33769	33769	33769
Prairie	933	921	921
Plantation	603	1503	4999
Fourée	74	74	74
Plan d'eau	70	70	70
Agglomération	2918	3528	4049
Savane à emprise agricole		242371	

De l'analyse de la figure 39 et du tableau XX, il ressort que le bassin versant est sujet à une régression des différentes unités naturelles d'occupation du sol. Ainsi, les forêts denses et les forêts galeries ont connu une régression sensible de leur superficie, qui passe de 43 321 hectares en 1978 à 33 808 hectares en 2010 d'une part et de 4 019 hectares à 1729 hectares, soit un taux de diminution respectivement de 0,70 % et de 0,17 % par rapport à l'état forestier du bassin versant en 1978. Dans la même période, les forêts claires et les savanes boisées d'une part et les savanes arborées et arbustives d'autre part, ont connu une régression de leurs superficies passant de 237 873 hectares à 833 278 hectares et de 1 003 411 hectares à 589 006 hectares soit un taux de recul de 11,42 % et de 30,61 % dans chacune de ces formations végétales. Concomitamment, il a été observé une augmentation de la

superficie des mosaïques de cultures et de jachères dans le bassin versant de la Sota, passant de 26 934 hectares en 1978 à 602 234 hectares en 2010 soit un taux de progression de 42, 50 % par rapport à la situation de 1978. Il y a donc eu un recul généralisé des forêts et des savanes sur l'ensemble du bassin versant avec une progression des surfaces cultivées et ou en jachère. L'augmentation de la surface de mosaïque et de jachère témoigne de l'ampleur de la dégradation des écosystèmes. L'appauvrissement de terres lié aux pratiques culturelles contraint les populations à les laisser en jachère. La mise en valeur de nouvelles surfaces cultivables appelle à la destruction des formations végétales

Le recul de la superficie des formations végétales augmente l'exposition du bassin versant à l'inondation, car le couvert végétal (forêt, bois) favorise le ralentissement du mouvement des eaux. En effet, la végétation permet de lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau. Les sols, plus poreux, sont alors à même de stocker de plus grandes quantités d'eau, jouant un rôle d'éponge, plus ou moins important selon l'état de saturation des sols. Elle permet de diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement de l'eau et enfin, la végétation maintient les sols grâce aux systèmes racinaires, améliorant ainsi la cohésion des sols et donc renforçant leurs propriétés mécaniques. La destruction des formations végétales met à nu les sols agricoles. Dans une zone agricole comme le bassin versant de la Sota, le ruissellement lié à de fortes précipitations entraîne le départ de terre par érosion de façon spectaculaire en creusant de profondes ravines ou plus discrètement en emportant les éléments fertiles du sol.

4-3. Vulnérabilité du bassin versant de la Sota

La vulnérabilité dans le bassin versant se décompose en deux approches. La vulnérabilité biophysique et la vulnérabilité sociale (ENDA et CIAT, 2005 ; Yamasaki et *al.*; 2012).

4-3-1. Vulnérabilité biophysique dans le bassin versant de la Sota

La vulnérabilité biophysique se limite au sens physique du terme. Elle fait uniquement référence à l'exposition de la surface physique face à l'aléa. Ce choix se justifie par le fait que les risques hydroclimatiques doivent d'abord être bien compris sous l'angle de ses processus hydrogéomorphologiques (Menad et *al.*, 2012).

4-3-1-1. Vulnérabilité à l'inondation

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la vulnérabilité d'un espace à l'inondation. Compte tenu des données existantes, la méthode cartographique a été utilisée pour déterminer la vulnérabilité à l'inondation du bassin versant. Pour cartographier les niveaux de vulnérabilité dans le bassin versant, plusieurs cartes thématiques ont été préalablement établies. La figure 40, présente les différentes cartes qui ont permis de déterminer la vulnérabilité à l'inondation dans le bassin versant de la Sota.

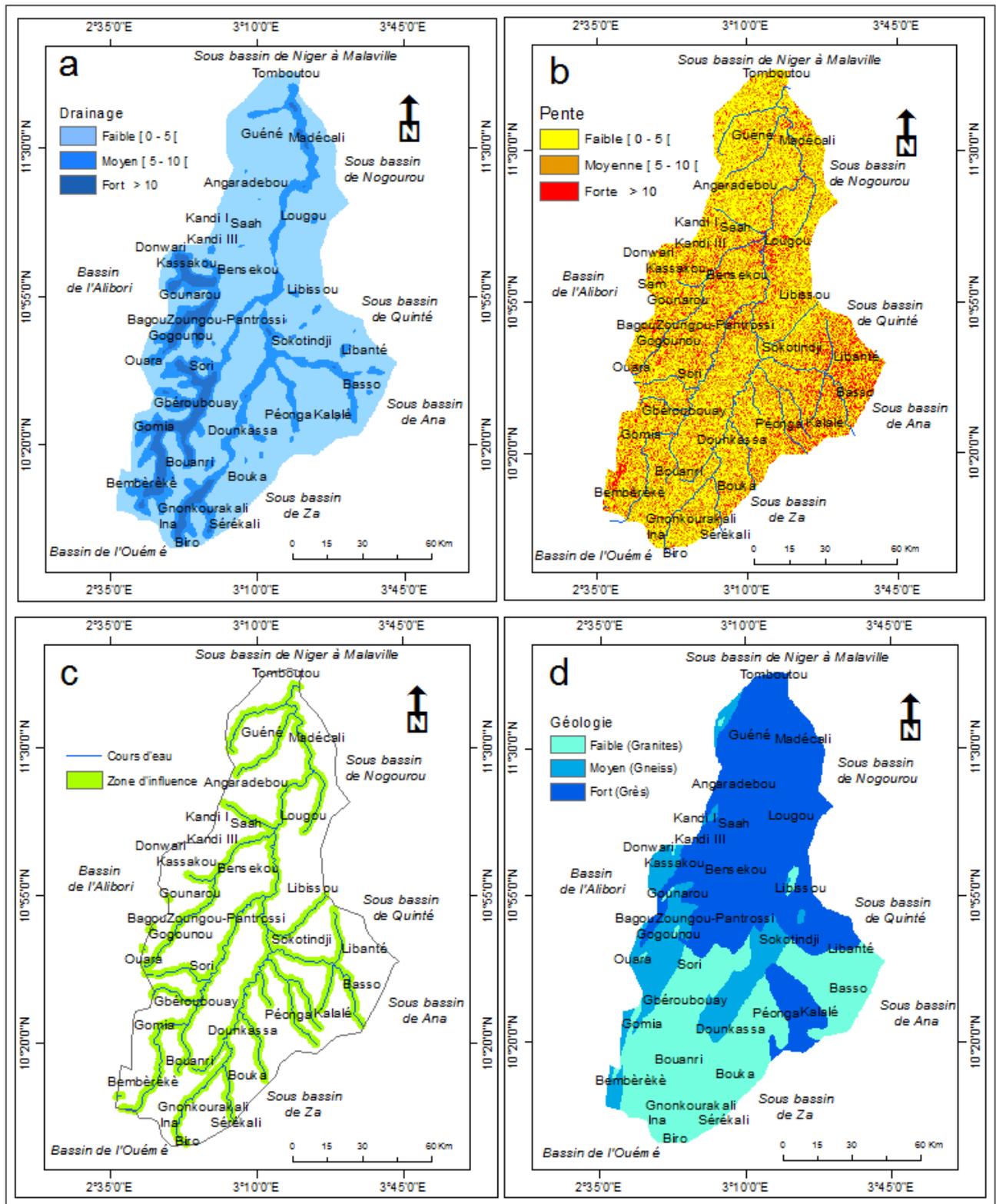


Figure 40: Différentes cartes thématiques pour l'établissement de la carte de vulnérabilité à l'inondation
a) densité de drainage b) Pentes c) zones d'influence des cours d'eau d) facies lithologique

La carte de vulnérabilité à l'inondation (figure 41) est obtenue par la combinaison des diverses cartes: la carte de densité de drainage (figure 40 a), la carte des pentes (figure 40 b), la carte des zones d'influence des cours d'eau (40 c) et celle lithologique (figure 40 d).

La vulnérabilité à l'inondation a permis d'identifier que dans le bassin versant de Sota, tous les secteurs où les caractéristiques intrinsèques de l'environnement (caractéristiques géologiques et géomorphologiques) sont susceptibles de favoriser une inondation. La figure 41 présente la vulnérabilité du bassin versant à l'inondation

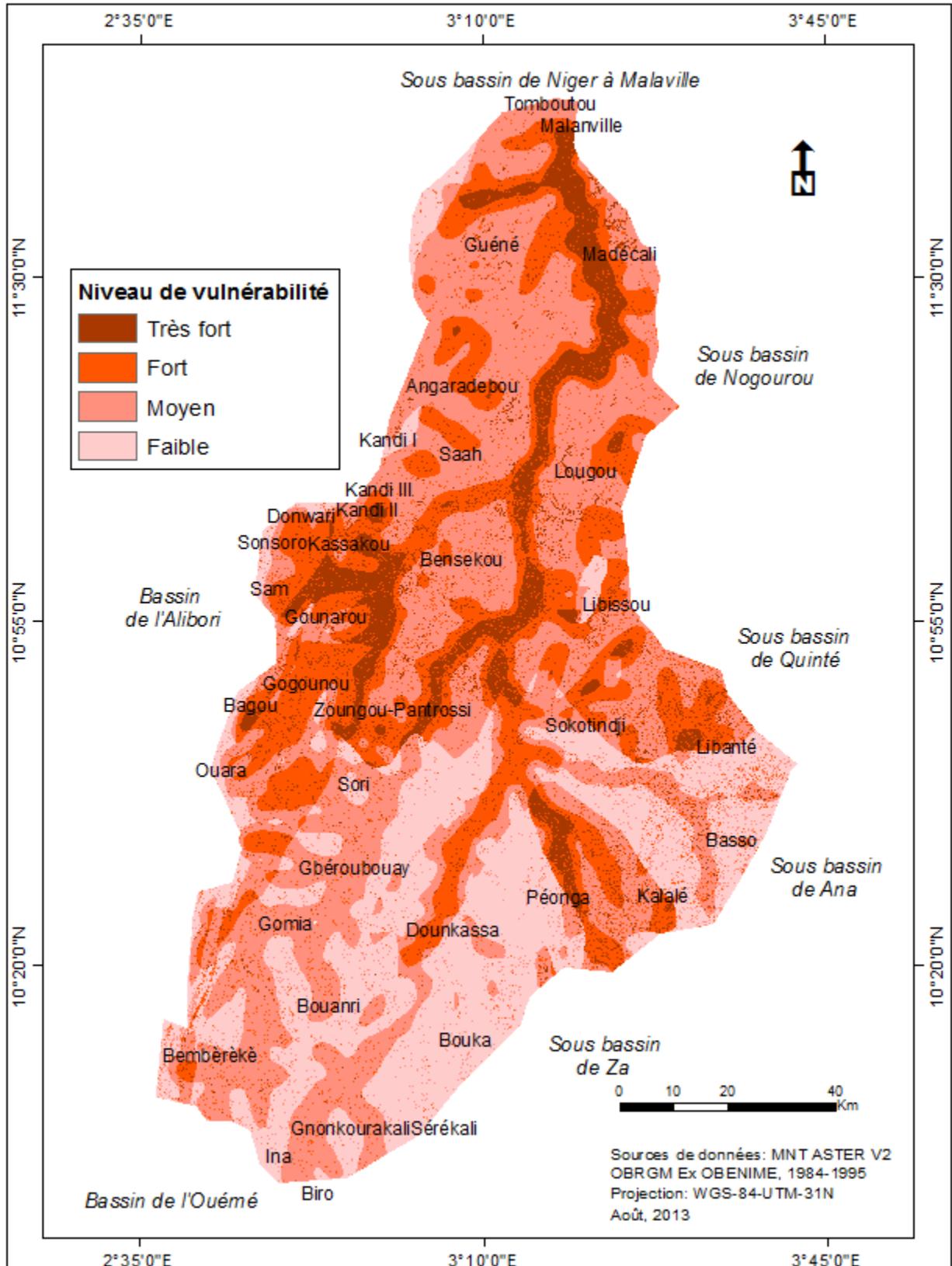


Figure 41: Vulnérabilité à l'inondation dans le bassin versant de la Sota

L'analyse de la figure 41 permet d'identifier quatre zones dont la vulnérabilité à l'inondation varie du faible au très fort. Les zones de faible vulnérabilité à l'inondation

couvrent 23 % du bassin versant et sont disséminées surtout dans la partie sud-est du bassin versant dans les localités de Bouka, Dunkassa, Sérékali, Ina Péonnga Bassa et Kandi I au nord-est. Les zones de vulnérabilité moyenne à l'inondation correspondent aux zones à pente moyenne où le ruissellement sur les versants ne permet pas à l'eau de stagner. Ces zones occupent 38 % de la surface du bassin versant et sont localisées au nord et au centre dans les localités comme Guéné a Malanville, Sokotindji, Saah, Lougou Bensekou et Bemberekè, Gamia, Bouari, Gberoubouay dans le sud-ouest du bassin versant. Les zones de forte vulnérabilité à l'inondation occupent 23 % bassin versant. Ces zones concernent les plaines sujettes à la submersion, et sont situées aux abords des cours d'eau dans les plaines qui longent les cours d'eau. Les agglomérations de Gogounou, Zoungou-Pantroussi, Gagou et Oura à l'ouest du bassin versant et Angaradébou au nord sont quelques-unes des localités concernées du centre et au sud du bassin versant. Les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation occupent 9 % du territoire et sont situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur de la rivière Sota et au nord du bassin versant dans les localités de Madécali, Tomboutou, et Kassakou et Kandi II à l'ouest.

4-3-1-2 .Aléa d'inondation

L'aléa d'inondation comprend les zones dans lesquelles des inondations sont susceptibles de se produire, de façon plus ou moins importante et fréquente, suite aux fortes précipitations ou au débordement des cours d'eau. La carte de l'aléa d'inondation représente donc des zones où il existe un risque d'inondation, même aux endroits où aucune inondation n'est historiquement connue.

Inversement, l'absence d'une zone d'aléa sur la carte ne peut garantir qu'une inondation ne s'y produira jamais. Ces zones ne concernent pas les inondations trouvant leur origine dans le refoulement d'égouts, de la remontée de la nappe phréatique ou de phénomènes apparentés. Il n'est ici question que des problèmes d'inondations trouvant leur origine dans le ruissellement et ou le débordement de cours d'eau. La présente cartographie de l'aléa prend en compte seulement la délimitation des zones d'aléa liées au ruissellement et au débordement des cours d'eau. La carte de l'aléa (figure 44) est obtenue par la combinaison de la distribution des champs pluviométriques (figure 43 a) et de la distribution des unités d'occupation du sol (figure 43 b). A partir de la distribution des unités d'occupation du sol (figure

42) et en tenant compte du rôle des différentes unités d'occupation de sol dans la production des écoulements de surface, une classification est faite.

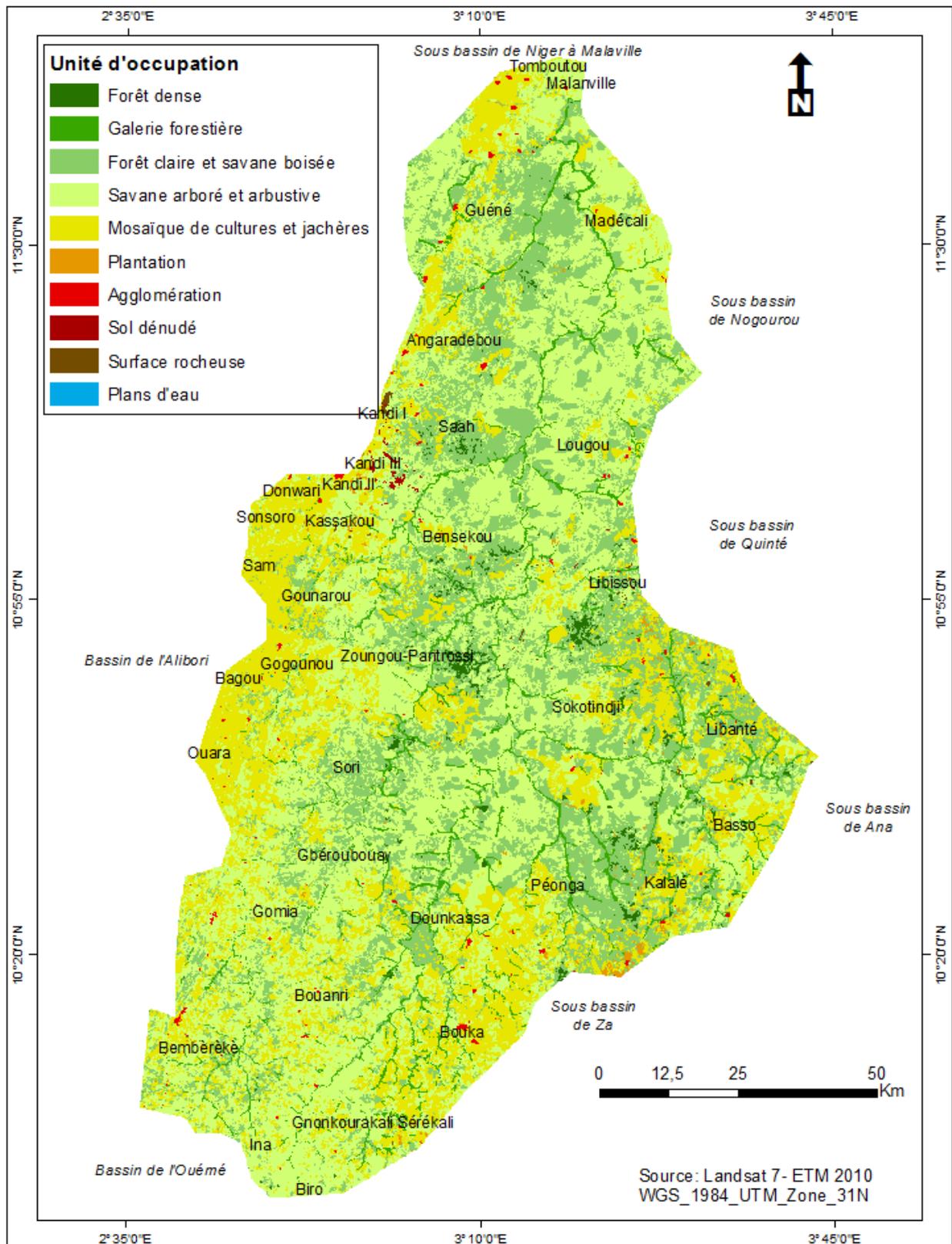


Figure 42: Unité d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota

A partir des unités d'occupation du sol trois classes ont été déterminées: faible pour (forêt dense, semi-décidue, galerie forestière et plantation), moyen (forêt claire, savane arborée et arbustive, champs et jachères), fort (agglomérations, formations marécageuses et plan d'eau). Cette classification a permis de réaliser la figure 42b.

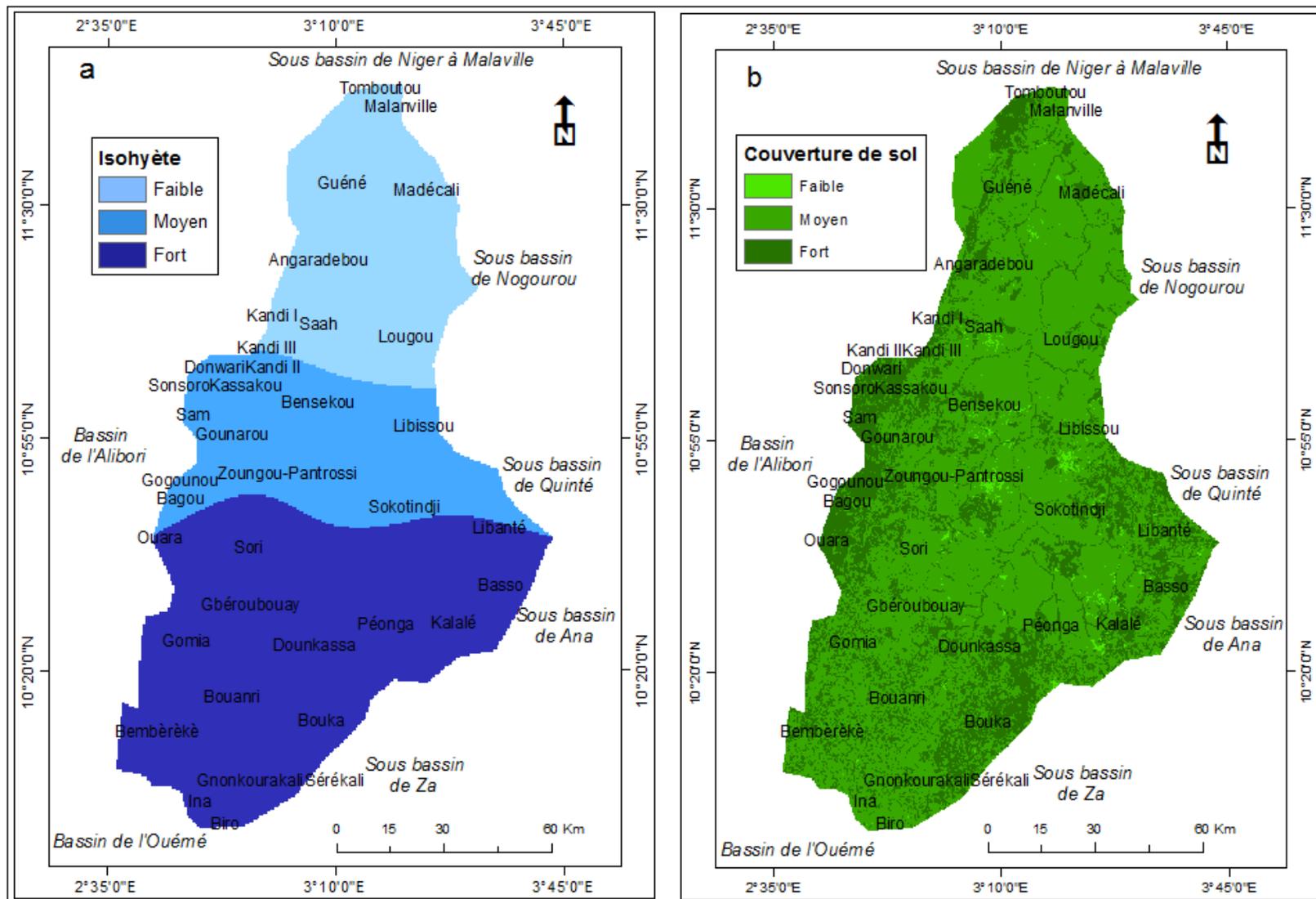


Figure 43: (a) Distribution de l'intensité pluviométrique;(b) Couverture du sol

L'aléa hydrométéorologique est intrinsèquement lié à la hauteur pluviométrique et à la nature de la couverture du sol qui reçoit l'information pluviométrique. Ainsi, pour cartographier l'aléa d'inondation (figure 44), la carte des champs pluviométriques (figure 43 a) et la carte de la couverture au sol (figure 43 b) ont été préalablement établies. La combinaison à l'intérieur d'un SIG de ces deux cartes thématiques a permis d'obtenir la carte de l'aléa d'inondation (figure 44)

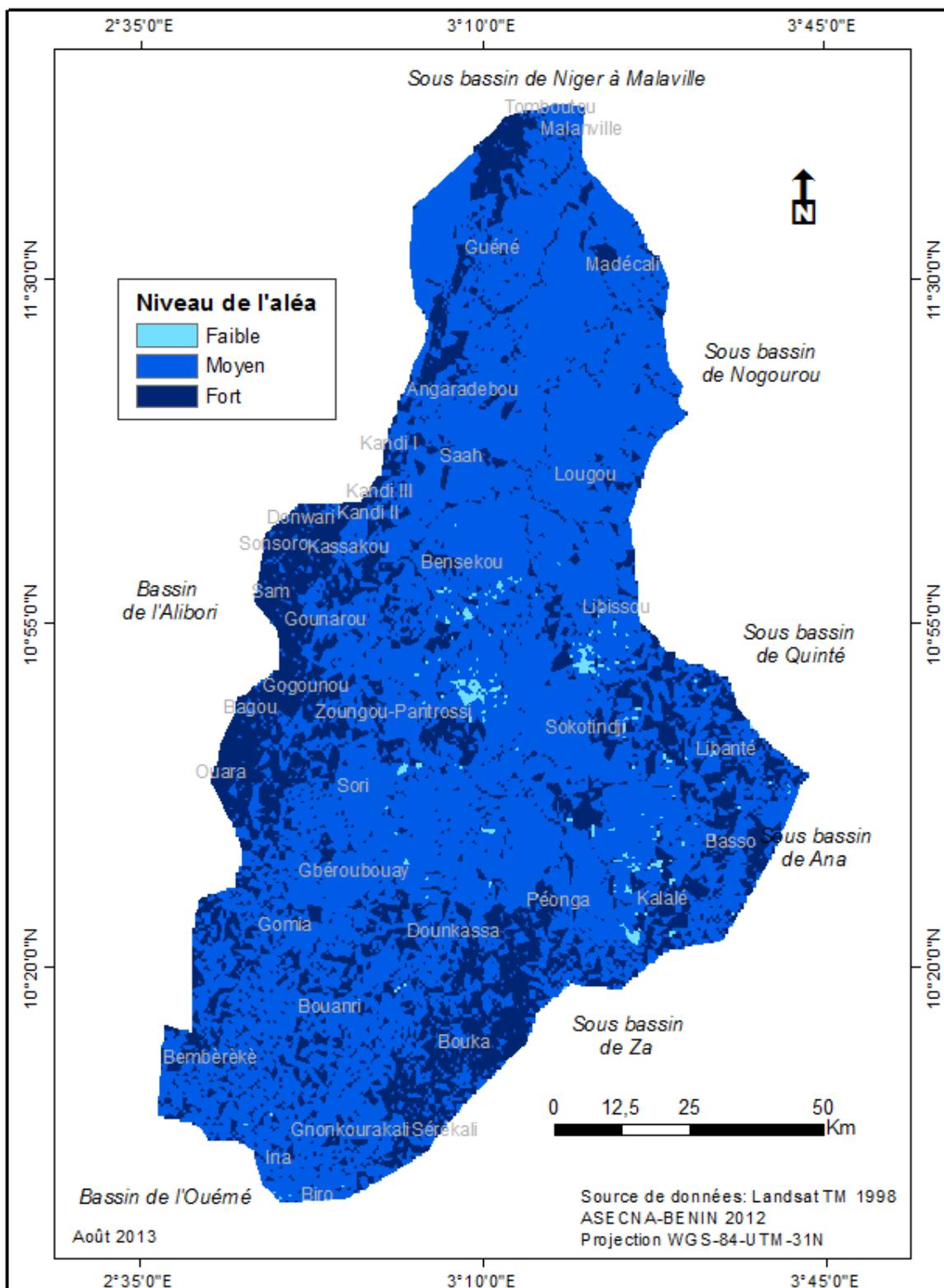


Figure 44: Aléa d'inondation

De l'analyse de la figure 44, l'aléa d'inondation dans le bassin versant est classé en trois niveaux ; c'est dire du faible au fort en passant par le moyen. Il ressort que la zone à faible aléa occupe 0,7 % de la superficie du bassin versant et se situe

principalement dans le secteur, à couvert végétal dense (forêt classée des trois rivières) et à pente forte. Les zones à aléa moyen sont dispersées sur l'ensemble du bassin versant. Elles représentent 72 % de la superficie du bassin versant et correspondent aux secteurs à couverture végétale moyennement dense (mosaïque forêt-culture, savane) et à altitude élevée. L'aléa fort occupe le reste du bassin versant, soit 26 % de la superficie du bassin versant et correspond aux forêts galeries et aux sols recouverts d'une végétation peu dense.

4-3-1-3. Risque d'inondation dans le bassin versant de la Sota

La cartographie des zones inondables constitue un des meilleurs outils de prévention des risques d'inondation surtout celles liées aux débordements des cours d'eau. En effet, l'élaboration et la diffusion d'informations sur les zones inondables lors des événements pluvio-hydrologiques extrêmes, permet aux décideurs, aux populations vivant dans ces zones et aux divers acteurs de prendre des dispositions nécessaires avant que la catastrophe ne se produise. Ainsi, la connaissance à l'avance de ces zones permet non seulement de prévenir mais aussi de mettre en place les dispositifs de secours afin de réduire la vulnérabilité des populations riveraines. Le risque d'inondation dans le bassin versant de la Sota, a été déterminé par le croisement des cartes de vulnérabilité à l'inondation et celle de l'aléa qui est le facteur déclencheur de l'inondation. La figure 45 présente les secteurs à risque d'inondation dans bassin versant de la Sota.

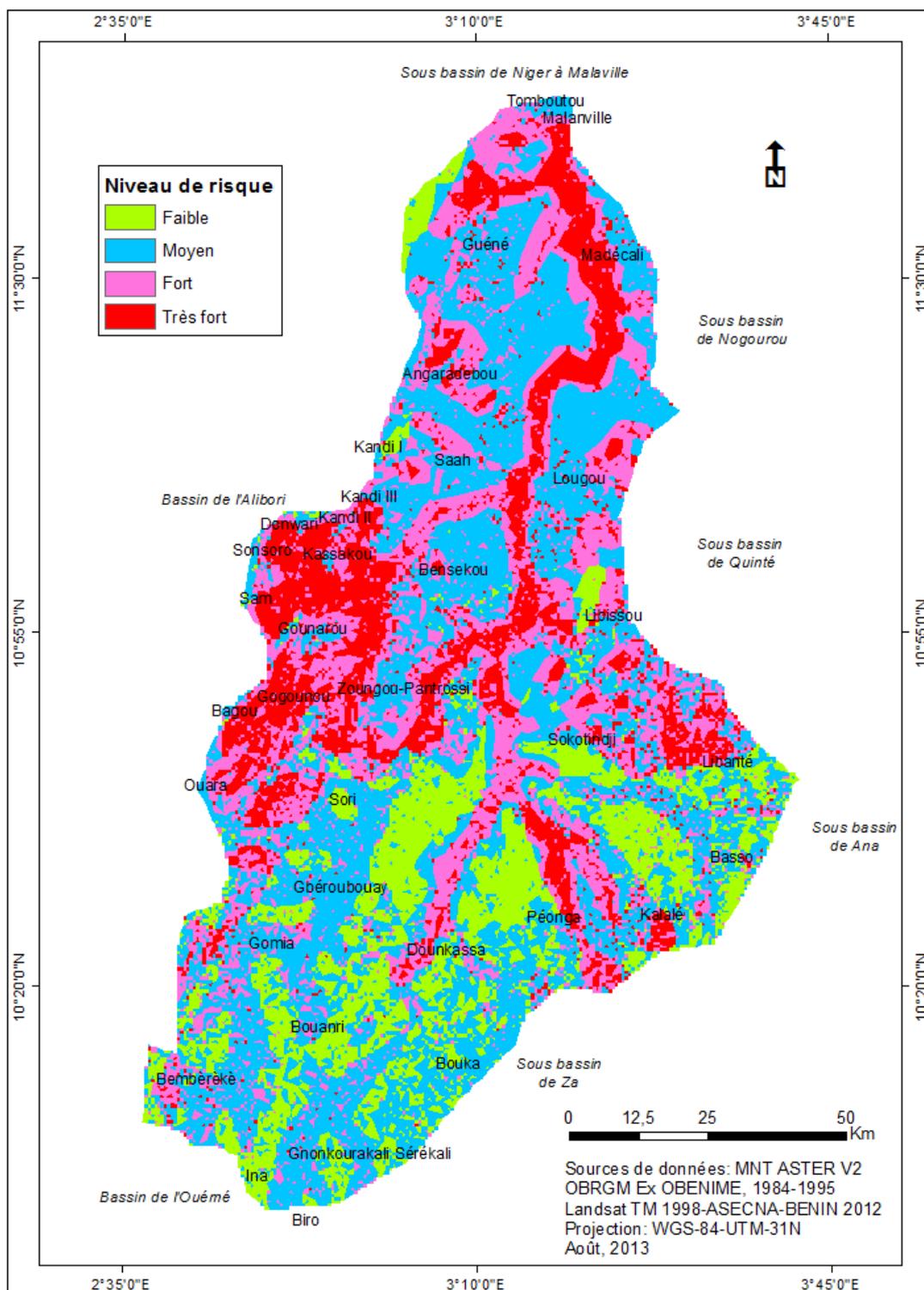


Figure 45: Zones à risques d'inondation

De l'analyse de la figure 45, il ressort que les zones à risque d'inondation dans le bassin versant de la Sota, varient de faible au très fort. Les zones concernées par les différents niveaux de risque ont été retenues après la superposition des informations recueillies sur le terrain et les résultats issues des traitements SIG. Ainsi, les zones à

risque faible couvrent 15 % de la surface et se situent principalement dans le sud du bassin versant. Les localités de Bouka, Gnonkourakali, Sérékalé, Ina Sori Basso sont les plus concernées. Les zones à risque moyen couvrent 38 % et sont dispersées sur l'ensemble du bassin versant. Elles se rencontrent dans les secteurs à pente moyenne. Les zones à fort risque sont situées dans les plaines le long des cours d'eau, Elles occupent 25 % du bassin versant et s'étendent principalement dans le nord et l'ouest du bassin versant. Ces zones présentent un danger évident lors des crues. Les zones à très fort risque sont situées aux abords immédiats des cours d'eau et occupent 16 % du bassin versant. Les localités de Madécali, Tomboutou, Donwari, Kassakou et Gogounou sont les plus concernées. Ces zones correspondent aux plaines alluviales et aux lits majeurs des rivières.

4-3-2. Vulnérabilité socio-économique du bassin versant de la Sota

La vulnérabilité socio-économique traite des déterminants politiques, socio-économiques, culturels et institutionnels de la vulnérabilité. Elle se mesure à l'aide d'indicateurs du type : niveau d'éducation, de revenus, de pauvreté et autres données comme le capital social, la diversification des moyens d'existence, le foncier, etc.

Partant du fait que les risques ne sont pas uniformes sur l'ensemble du bassin versant, et de plus la vulnérabilité socio-économique varie en fonction des modes et moyens d'existence, les mailles ont été formées pour faciliter l'analyse sur le bassin versant. Les mailles sont formées en s'inspirant des travaux de PANA Bénin 2008. Ces mailles regroupent les communes subissant les mêmes contraintes physiques, biologiques et sociales dans lesquelles les populations développent les mêmes stratégies d'adaptations appelée zones agro-écologiques (figure 46).

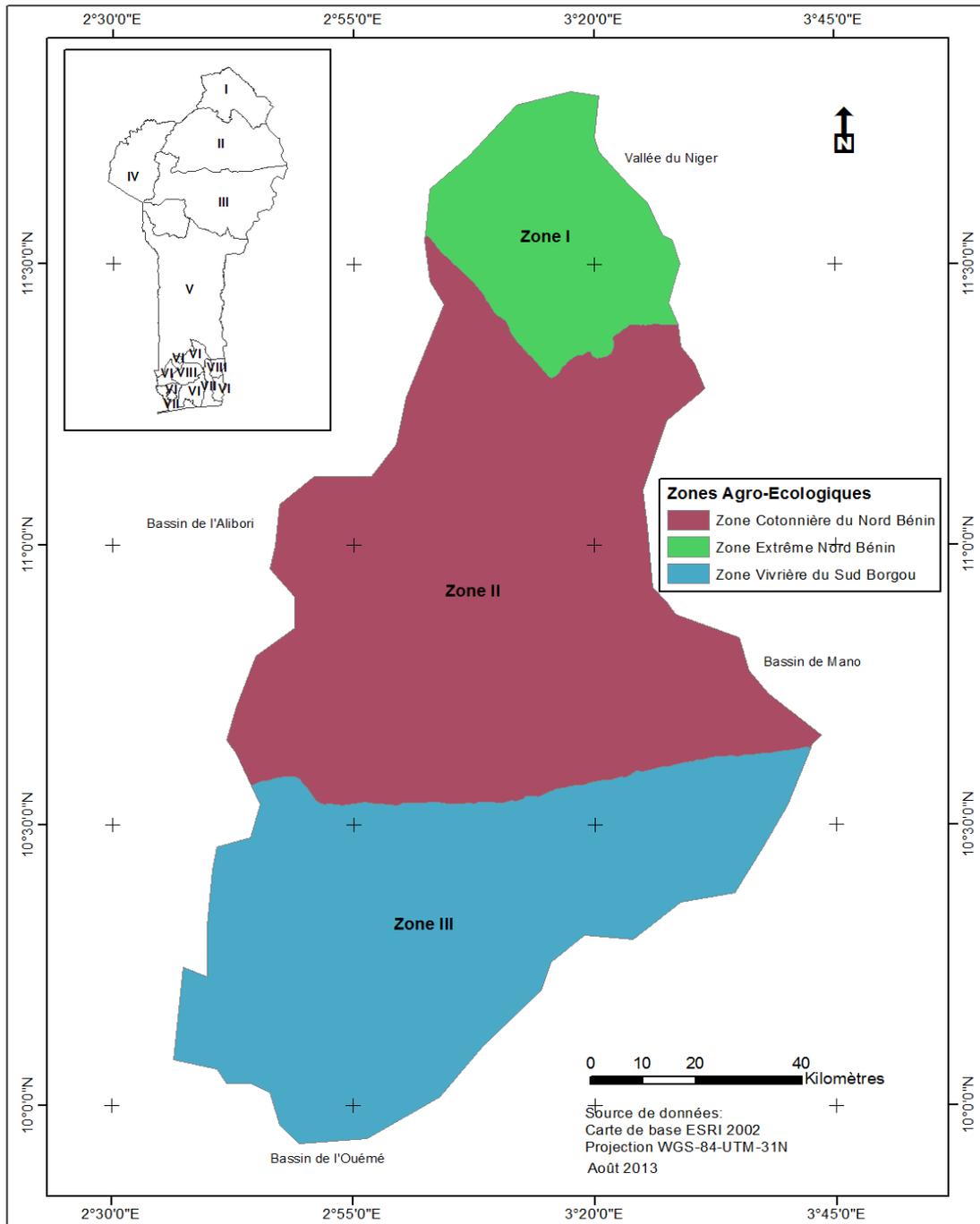


Figure 46: Zones agro-écologiques dans le bassin versant de la Sota

La superposition de la carte du bassin versant de la Sota avec la carte des zones agro-écologiques du Bénin définies par l'INRAB permet de distinguer trois zones agro-écologiques dans le bassin versant de la Sota:

La zone I, extrême Nord-Bénin couvre la commune de Malanville;

La zone II, zone cotonnière du Nord –Bénin couvre les communes de Ségbana, Gogounou, Kandi;

La zone III, zone vivrière du Sud-Borgou regroupe les communes de Kalalé, Bemberekè ; Nikki, N'dali.

Divers moyens d'existence et modes d'existence sont énumérés par les populations dans les différentes zones agro écologiques. Ces moyens et modes d'existences sont influencés par plusieurs risques hydroclimatiques.

Pour la détermination de la vulnérabilité socio-économique dans le bassin versant, les zones agro écologiques II et III ont été fusionnées compte tenu de l'homogénéité des caractéristiques et dans les variables abordées.

4-3-2-1. Présentation de la zone Agro-écologique I dans le bassin versant

La Zone agro-écologique dans le bassin versant de la Sota abrite seulement la commune de Malanville. Cette commune a une population de 144843 habitants en 2013 (RGPH4, résultats provisoires) avec une densité moyenne de 20 habitants au km². D'une manière générale, la population est à 75% agricole et essentiellement rurale hormis l'arrondissement de Malanville (INSAE, 2013).

L'économie de la commune de Malanville repose essentiellement sur le secteur primaire constitué par l'agriculture, l'élevage, la pêche, l'exploitation forestière et le secteur tertiaire. La présence du périmètre rizicole irriguée avec l'exploitation du fleuve Niger (maîtrise de l'eau), du périmètre pilote de la Sota et la presque monoculture de riz à Bodjécali font de la commune de Malanville la première productrice de riz. Seul l'arrondissement de Guéné produit le coton et le maïs. La production de contre saison (saison sèche) a connu un accroissement dans la commune au niveau des arrondissements de Malanville, Tomboutou, Madécali et Garou avec le maraîchage, la riziculture et la culture de la pomme de terre (Djenontin, 2010).

Le climat dans la commune est de type Soudano-Sahélien marqué par une saison sèche de novembre à avril et une saison de pluies de mai à octobre. Le vent dominant est l'harmattan soufflant de novembre en janvier dans tous les sens avec des écarts de température variant entre 16 et 25°C. Elle est drainée par le fleuve Niger ses affluents l'Alibori (338km) et la Sota (250 km).

Les principaux risques hydroclimatiques identifiés par les populations sont dans cette zone sont : la sécheresse, l'inondation, les pluies tardives et violentes, la chaleur excessive.

Les secteurs d'activités économiques les plus vulnérables dans la commune sont l'agriculture, l'élevage, la santé, les ressources en eau, la forêt/faune, le transport, l'éducation, l'habitat.

4-3-2-2. Sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques

Le tableau XXI, traduit la sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques dans la zone agro écologique I

Tableau XXI: Matrice de sensibilité aux risques hydroclimatiques dans la Zone agro-écologique I

	Risques hydroclimatiques		Indice d'exposition	Classement
	Sécheresse	Inondation		
Agriculture	3	5	80 %	1 ^{er}
Elevage	3	4	70 %	2 ^e
Ressources en eau	4	2	60 %	3 ^e
Transport	1	3	40 %	5 ^e
Habitat	1	4	50 %	4 ^e
Education	1	4	20 %	7 ^e
Faune et flore	2	2	40 %	6 ^e
Indice d'impact	43 %	69 %		

Source : Traitement des données

La lecture de ce tableau XXI fait ressortir que dans la zone agro-écologique I, l'inondation et la sécheresse sont respectivement les risques hydroclimatiques majeurs. Les secteurs d'activités les plus exposés à ces risques sont l'agriculture, l'élevage, les ressources en eau, l'habitat, la biodiversité, l'éducation. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents, les pêcheurs et les éleveurs.

4-3-2-3. Présentation de la zone agro-écologique II et III dans le bassin versant

Les zones agro-écologiques II et III dans le bassin versant de la Sota regroupe les communes de Ségbana, Gogounou, Kandi, Kalalé, Bemberekè, Nikki et N'dali. Ces communes ont une population estimée à 839.576 habitants en 2012 (RGPH4, INSAE, 2013) avec une densité moyenne de 28 habitants au km². L'agriculture est la

principale activité des populations. La population agricole est de 587703 habitants, soit 67,92% de la population totale du département (INSAE, 2013).

L'économie dans la zone est essentiellement agricole avec une large part aux cultures vivrières (sorgho, mil, maïs, fonio, riz, manioc, igname etc). Ces cultures sont associées à d'autres telles que les oléagineux (arachides) et les légumineuses. L'agriculture industrielle porte essentiellement sur le coton, l'anacarde. L'élevage de gros bétail est très répandu et permet le développement de la culture attelée. Le petit élevage (ovins, caprins et avicole) et la pêche très développés complètent les activités économiques et le tout alimente un important réseau de marchés traditionnels dont les plus dynamiques sont ceux de Parakou et Nikki (INSAE, 2006). Le climat dans cette zone est de type Soudanien marqué par une saison des pluies qui commencent en Avril et dure environ sept mois et une saison sèche qui débute en octobre La température moyenne annuelle s'établit autour de 26°C avec un maximum de 32°C en mars et redescend aux environs de 23°C en décembre-janvier. L'humidité relative varie entre 30 et 70 %.

Les principaux risques hydroclimatiques identifiés par les populations dans cette zone sont: les pluies tardives et violentes, la sécheresse, les vents violents, La chaleur excessive, L'inondation.

Les secteurs d'activités économiques les plus vulnérables dans la commune sont: l'agriculture, l'élevage ; la santé ; les ressources en eau ; la flore et la faune, le transport ; l'éducation, l'habitat.

4-3-2-4. Sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques

Le tableau XXII, traduit la sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques dans la zone agro écologique II et III.

Tableau XXII: Matrice de sensibilité aux risques climatiques dans la Zone agro-écologique II et III

	Risques hydroclimatiques		Indice d'exposition	Classement
	Sécheresse	Inondation		
Agriculture	3	4	70 %	2 ^e
Elevage	4	2	60 %	3 ^e
Ressources en eau	5	3	80 %	1 ^{er}
Transport	2	2	40 %	5 ^e
Habitat	2	3	50 %	4 ^e
Education	1	2	30 %	6 ^e
Faune et flore	4	2	60 %	3 ^e
Indice d'impact	60 %	51 %		

Source : Traitement des données

Il ressort de l'analyse du tableau XXII que dans la zone agro-écologiques II et III, les sécheresses et les inondations sont respectivement les risques hydroclimatiques majeurs que connaissent les populations. Les ressources les plus exposées à ces risques sont les terres, l'agriculture, les ressources en eau et l'élevage, la biodiversité. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents, les pêcheurs et les éleveurs.

De façon générale, dans le bassin versant de la Sota, les inondations et la sécheresse constituent, par ordre croissant d'importance, les risques climatiques majeurs. Les ressources les plus exposées à ces risques sont l'agriculture vivrière, les ressources en eau et la biodiversité. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents, les pêcheurs. Ainsi, les groupes sociaux dominants les plus affectés ce sont les groupes à la fois les plus vulnérables au point de vue socio-économique, et les plus exposés aux risques climatiques

4-4. Vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Le développement des activités socio-économiques des populations du bassin versant de la Sota est intimement lié aux rythmes hydro-climatiques car ces populations sont pour la plupart des acteurs du secteur primaire (agriculture, élevage, maraîchage, etc.). La perturbation observée ces dernières années dans les

paramètres hydro-climatiques ne peuvent donc qu'impacter les modes de vie de ces populations. Ce paragraphe est consacré aux impacts des risques hydro-climatiques sur les écosystèmes du bassin versant de la Sota.

4-4-1. Incidences des risques climatiques sur les ressources en eau

Il s'agit essentiellement de présenter ici l'influence des chaleurs excessives, des pluies tardives, des poches de sécheresse, de la mauvaise répartition des pluies et des inondations sur les ressources en eau.

4-4-1-1. Chaleurs excessives

Des enquêtes de terrain, il ressort que 75 % des producteurs interrogés ont affirmé que l'assèchement précoce et prolongé des ressources en eau utilisables pour les activités agricoles telles les forages, les cours d'eau, les marigots et les barrages hydro-agricoles est provoqué par les chaleurs excessives. Selon eux, les poches de terres sèches observées sur le fleuve Niger sont provoquées par les chaleurs excessives. Les observations faites au cours de la présente étude permettent de dire qu'en réalité, il se produit une diminution du niveau d'eau faisant apparaître des poches de terres. De même, des propos d'un sexagénaire dans le village de Basso qui sont par la suite confirmés par 66 % des populations interrogées, il ressort que le qu'une section du cours d'eau qui passe entre le village de Banitè et celui de Guéné a complètement diminué en surface. Environ 52 % de ces populations interrogés ont conclu que ce cours d'eau est menacé de disparition. Les températures excessives entraînent donc la diminution progressive des ressources en eau.

4-4-1-2. Pluies tardives

L'analyse des données pluviométriques atteste que la saison sèche est devenue plus longue qu'auparavant ce qui a pour conséquence le démarrage tardif de la saison des pluies. L'impact direct de ce risque est le bouleversement du calendrier de la production de la saison, affirment 78 % des producteurs interrogés. Cette situation oblige les producteurs à déplacer les périodes de semis des cultures. Par exemple, la période du 1er au 20 juin recommandée par la vulgarisation pour la culture du coton paraît ne plus être la meilleure pour les paysans. Les meilleures périodes de semis sont déterminées par le paysan qui se base sur les dates de démarrage des pluies. Dans les Communes du bassin versant de la Sota, 61 % des paysans affirment qu'ils exploitent les forages et les cours d'eau pour satisfaire le besoin en

eau des cultures surtout les cultures maraichères particulièrement à la phase du lever. On en déduit que les pluies tardives conduisent davantage au recours à l'irrigation qui entraînent des coûts supplémentaires de production.

4-4-1-3. Mauvaise répartition des pluies

La mauvaise répartition spatiale et temporelle des pluies a été identifiée comme un risque hydro-climatique qui affecte les ressources en eaux nécessaires au développement des activités développées par les populations. Les impacts de cette situation se manifestent par un démarrage tardif des activités de production d'une part et par un faible rendement agricole d'autre part et ce, d'une région à une autre. Cette mauvaise répartition des pluies a aussi pour conséquence l'assèchement des plants (67 % des producteurs). Dans un milieu où les conditions socio-économiques des populations ne sont pas du tout reluisantes, ces risques ne peuvent que rendre plus vulnérable le mode d'existence de ces dernières.

4-4-1-4. Inondations

Les expériences vécues par les populations les ont amenées à mettre en valeur les abords des cours et plans d'eau pour prévenir les déficits hydriques en cas d'une éventuelle sécheresse. Mais elles sont parfois déçues si en lieu et place des sécheresses elles assistent aux hautes eaux (inondations).

Les dégâts causés par les inondations sont souvent majeurs quand il y a une rivière saisonnière proche du champ. L'excessivité de la pluie rend inefficace les traitements phytosanitaires et l'utilisation de l'engrais, d'après les producteurs. En effet, ils expliquent que les intrants ruissellent dans l'eau. Les inondations sont donc un risque qui affecte les ressources en eau par le transport de produits nocifs et le développement de germes nuisibles. Or 61 % des populations ont recours aux eaux de surface pour satisfaire leurs besoins en eau. Les inondations dégradent la qualité des ressources en eau.

Quand il s'agit des cultures installées dans les zones de dépression, les conséquences sont plus dramatiques comme l'illustre la photo 1.



Photo 2: Champs du maïs inondés à Bakpara (Kandi)

Prise de vue : Koumassi, septembre, 2012

Les zones de dépression étant inondables, les cultures sont inondées. Cette situation vécue par un riziculteur à Malanville est décrite à travers des propos présentés dans l'encadré 1.

Encadré 1 : Propos d'un riziculteur de Malanville

Les inondations de l'année passée (2011) ont tout emporté dans ma rizière. Juste après l'étape du lever quand je me préparais à aller faire l'épandage des engrais, l'eau est venue envahir le champ. Mais j'espère que quelques temps après la disparition de l'eau je procède à l'opération. Grande était ma surprise après avoir constaté le pire : les inondations étaient venues tout emporter. J'ai roulé à perte en 2011 tout comme en 2010 ; je ne voudrais plus vivre ces situations dramatiques.

Ces drames hydroclimatiques font que les paysans n'arrivent plus à cultiver dans les bas-fonds quand les hauteurs de pluies sont importantes. Il y a l'eau partout et les cultures sont immergées. Même le riz n'arrive plus à flotter sur l'eau. Ils ne peuvent plus mettre de l'engrais, ni rien faire. Pire, on enregistre des inondations qui salinisent les bas-fonds en les rendant improductifs.

En somme, les risques hydroclimatiques ont des incidences sur les ressources en eau, et sur les activités agricoles. Toutes ces incidences concourent à la baisse des rendements agricoles, hypothéquant de ce fait la sécurité alimentaire.

Pour les impacts des inondations sur les eaux de consommation, la situation est critique. Dans les hameaux inondés et dans lesquels les populations ont refusé de se déplacer, il y a encore de l'eau de forage à laquelle l'accès est possible par barque, mais les populations déversent dans les eaux tous les déchets y compris les

excrétas. Les habitations sont humides et les enfants pataugent dans les eaux, ce qui peut faire craindre très prochainement les maladies hydro-fécales, les IRA et les dermatoses.

Aussi faut-il le signaler, dans le bassin versant de la Sota, les changements dans les paramètres du climat vont influencer sur l'évapotranspiration et partant sur la quantité et la répartition spatiale et temporelle du ruissellement de surface. C'est ce qui explique les variations observées dans les débits. Les réserves d'eaux souterraines seraient également affectées mais les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour estimer leurs variations.

La diminution des ressources hydrologiques est accompagnée d'une augmentation de l'évapotranspiration engendrée par les fortes chaleurs. Comme impact socio-économique sur les ressources en eau, la réduction des hauteurs de pluies a affecté les activités agricoles traditionnelles ce qui va favoriser l'exode rural. Les déplacements des populations vers les zones urbaines vont augmenter la demande en eau des collectivités (les besoins en eau en milieu rural étant de 35 l/j/hab. contre 90 l/j/hab. en milieu urbain, DGE, 2007). Ce mouvement peut également provoquer une augmentation des eaux usées domestiques.

4-4-2. Incidences des risques hydro-climatiques sur les infrastructures socio-économiques

Les infrastructures socio-économiques ne sont pas épargnées, pour la plupart, par les risques hydroclimatiques en l'occurrence les inondations. En effet, avec les habitations (photo 3) qui sont souvent inondées, on compte des sinistrés qui vont occuper les écoles, hypothéquant la rentrée scolaire suivante dans les hameaux environnants. Les investigations en milieux réels ont révélé également que les enfants des hameaux frontaliers fréquentent les écoles nigériennes et nigérianes (55 % des personnes interrogées).



Photo 3: Complexe scolaire inondée à Madjécali
Prise de vue : Koumassi, septembre, 2012

La figure 47, montre la proportion des écoles inondées sur l'ensemble du bassin versant de la Sota

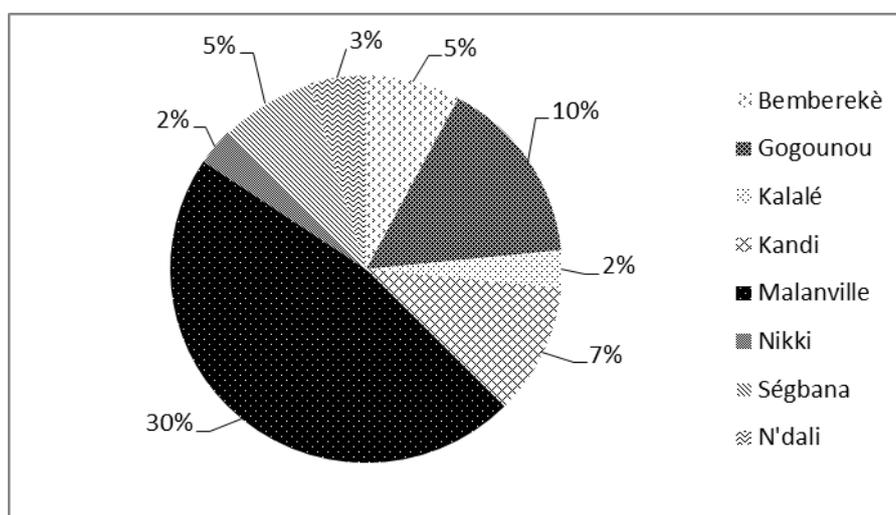


Figure 47: Proportions des écoles inondées par Communes dans le bassin versant de la Sota

L'examen de la figure 47, montre que les infrastructures scolaires sont touchées dans toutes les communes du secteur d'étude. Toutefois, la Commune de Malanville est la plus touchée avec 30 % environ des écoles inondées (2010). En effet, des 42 écoles que compte la commune, 10 (en matériaux définitifs) sont envahies régulièrement par l'eau. Les trois écoles en matériaux précaires se sont écroulées suite aux inondations enregistrées en 2010. Parmi celles n'ayant subi aucun dégât, 5 au moins abritent chaque année les populations déplacées.

Quant aux infrastructures routières, elles sont dans un état de dégradation avancée. Selon 90 % des acteurs enquêtés, cette dégradation a pour grande cause les inondations récurrentes. Cette situation est d'autant plus criarde que les moyens de

transport utilisés par la population en cette période de crise sont : les motos, les vélos et surtout les barques et pirogues. Les marchés sont inaccessibles compte tenu de l'état des voies. Aussi, plusieurs villages sont-ils enclavés du fait de l'impraticabilité des voies d'accès. C'est le cas par exemple des villages de Madjècali à Malanville et Gansso à Kandi (Photo 4 et 5) qui ne sont accessibles qu'en pirogue pendant les périodes de crue.



Photo 4: Village de Madjècali enclavé enclavé



Photo 5: Village de Gansso

Prise de vue : KOUMASSI, Septembre 2012

L'examen de ces deux photos montre deux villages enclavés à la suite des inondations dans le bassin versant. Ce phénomène est récurrent dans les zones inondables du bassin versant. Pendant ces inondations, les habitants de ces villages sont coupés du reste du monde. L'accès à ces villages n'est possible qu'en pirogue. Cet enclavement des localités perturbe le développement des activités économiques (agriculture, commerce, transport, élevage).

Les informations et les observations de terrain révèlent que les routes sont fréquemment coupées suite aux inondations. C'est le cas sur l'axe N'Dali-Djougou, où la voie est souvent coupée au moins à trois niveaux par les dégâts des cours d'eau, surtout au niveau du pont de Dadou (22 km de N'Dali) en 2012. La mairie avait fait installer à l'endroit coupé des planches en bois pour faciliter le passage à pied des usagers de la voie. Toutefois, selon les informations reçues des autorités communales, la route a été coupée à cause de la rupture du barrage situé non loin du pont. Le même phénomène a été observé sur l'axe Malanville Tomboutou où la

route (photo 6) a été coupée en deux sous la pression des eaux de ruissellement issues des fortes pluies



Photo 6: Route coupée sur l'axe Malanville –Tomboutou
Prise de vue : KOUMASSI ; 2012

De l'examen de la photo, il faut remarquer que l'eau de ruissellement, issue des fortes pluies a littéralement emporté la chaussée.

4-4-3 Influence des risques hydroclimatiques sur le secteur agricole et la sécurité alimentaire

La réaction des cultures aux risques hydroclimatiques varie beaucoup selon les espèces, les cultivars, les conditions du sol et d'autres facteurs locaux. Dans le bassin versant de la Sota où les températures sont proches des valeurs maximales tolérées par certaines cultures et où domine l'agriculture non irriguée, le rendement diminue de façon globale, même avec une hausse minime des températures. Il est encore plus durement affecté avec une nette baisse des précipitations.

Comme l'ont signalé plusieurs auteurs (Mouton et Sillans, 1954 ; Sircoulon, 1986 ; Snijders, 1986 ; Boko, 1988 ; Hubert et *al.*, 1989 ; Houndénou, 1999 ; Afouda, 2001 ; Ndjendolé, 2001 ; Oguwalé, 2006 ; Lanokou et *al.*, 2012), des divers facteurs qui conduiront à une baisse de la productivité de l'agriculture dans les zones tropicales et subtropicales, les hauteurs de pluies viennent en tête. En effet, les perturbations induites par l'irrégularité des hauteurs de pluies se manifestent par, entre autres, le déficit hydrique, la fréquence et la durée des sécheresses, la modification de la durée de la saison de croissance, etc. Dans un environnement caractérisé par

l'augmentation de la dégradation des sols, de la modification des zones de distribution des insectes ravageurs des cultures, ces risques climatiques ne peuvent que mettre de «bornes naturelles» aux ambitions socio-économiques des producteurs (paiement de vivres, des soins de santé et vêtements, construction de logement, instruction des enfants etc.) dans une localité déjà caractérisée par le manque d'engouement à la scolarisation des enfants.

Les conditions climatiques actuelles ne font que baliser du terrain à la misère des paysans si rien n'est fait dans les années à venir. Du reste, dans ces perspectives, il ne fait pas de doute que les cultivateurs du bassin versant de la Sota subiront, en raison de la variabilité climatique, des limitations de leurs productions agricoles qui demeurent les principales sources de subsistance des populations, surtout dans ces zones où la désertification suit une croissance inquiétante (Pofagi et Tonouewa, 2001).

D'une façon plus précise, on retient que les risques climatiques menacent non seulement la disponibilité des moyens d'existence des populations mais aussi et surtout la sécurité alimentaire.

La variabilité des précipitations dans le secteur d'étude est très importante puisqu'elle crée des risques qui peuvent atteindre parfois 40 à 80 % des producteurs. De façon globale, les impacts de ces risques sur la croissance du secteur agricole pourraient se traduire par :

- une modification de l'emplacement des zones de culture optimales pour des cultures données, entraînant le déplacement de ces zones ;
- une baisse des rendements agricoles,
- une modification des types, de l'emplacement et de l'intensité des parasites et des maladies.

Ces impacts entraînent des conséquences lourdes sur les modes d'existence des populations et amenuisent leurs conditions socio-économiques. On assiste à des modifications dans le type d'exploitations et d'utilisation des terres cultivables, l'exode rural, la diminution dans le revenu rural, dans la contribution au PIB et dans les recettes d'exportation.

Ces situations socio-économiques très délicates ne font que rendre la satisfaction des populations en matière de sécurité alimentaire incertaine. Ainsi, lors de la campagne agricole de 2012, sur 9685 ha de riz, 4041 ha de maïs, 1965 ha de sorgho et 3500 ha de mil emblavés dans la Commune de Malanville dans les 15

villages les plus touchés dans les quatre arrondissements sinistrés, 5000 ha, 3025 ha, 1154 ha et 512 ha respectivement en riz, maïs, sorgho et mil ont été détruits. En résumé, sur 19 191 ha de superficies emblavées, 9 691 ha ont été détruites, ce qui représente environ 50 % des pertes de superficies emblavées pour les cultures vivrières. Il y a donc un risque avéré d'insécurité alimentaire.

De même, dans la Commune de Kandi, sur une superficie totale emblavée des cultures vivrières principales de 22 675 ha (toutes spéculations confondues), environ 13 949 ha soit 62 % ont été englouties par les eaux et les cultures entièrement détruites. Il s'agit de 3768 ha de maïs, 2639 ha de sorgho, 1025 ha de mil, 6517 ha de riz. Selon les populations touchées par ces risques, la probabilité que la moitié de la superficie emblavée de cultures cette année (2013) soit affectée, cette fois ci, par le manque d'eau est élevée si les pluies tardent encore de quelques semaines, puisque qu'actuellement, le manque d'eau est déjà assez fort et le risque sera plus élevé les jours à venir.

4-4-5. Influence des risques hydro-climatiques sur l'élevage

Les risques hydroclimatiques influencent aussi le secteur pastoral. En effet, des modifications ont été observées dans les structures et les limites des zones pastorales, la dégradation de la qualité et la quantité des fourrages naturels, la diminution de la productivité animale et la répartition exacerbée des maladies et des parasites.

En effet, certains bas-fonds utilisés habituellement comme pâturage en saison sèche, ne permettent plus aujourd'hui de jouer ce rôle et l'espace à paître a sensiblement diminué selon les populations enquêtées. Si les risques hydro-climatiques sont liés aux gaz à effet de serre, en particulier à une forte concentration de CO₂, la valeur nutritive du fourrage pourra en souffrir (Issa, 2012). Le fourrage ne serait pas assez riche en azote et phosphore.

Ainsi, les risques hydroclimatiques font subir de fortes pertes dans le secteur de l'élevage en raison des maladies, manque d'eau et noyades des animaux. Chaque habitant perd par exemple au moins 4 à 8 animaux pendant les inondations.

Par exemple, les pertes enregistrées dans la Commune de Kalalé en 2012 sont dues au niveau des eaux de la rivière Tassiné sortie de son lit sur plus de 600 mètres avec des hauteurs de 0,5 à 1 mètre sur la terre ferme, les populations qui pratiquent l'élevage ont enregistré des pertes de l'ordre de 487 têtes. De ce fait, le commerce

des animaux qui s'effectue à travers un réseau de marchés hebdomadaires importants a été affecté avec des répercussions sur la sécurité alimentaire.

4-4-6. Influence des risques hydro-climatiques sur les établissements humains et la santé

Les caractéristiques des établissements humains dans le bassin versant de la Sota, sont les développements anarchiques, le manque de structures nationales de contrôle et la faiblesse des infrastructures. Ainsi, il existe très peu d'indicateurs fiables sur l'évolution de l'habitat. Des personnes enquêtées sur le terrain, près de 60 % vivent dans des habitations précaires. En effet, dans le bassin versant de la Sota ; les maisons sont construites en banco (87 %) ou en paillette (8%). Pour la construction de ces habitations le matériau dominant est le banco utilisé de façon brute ou en association avec du ciment pour augmenter sa résistance. Or ces matériaux sont particulièrement sensibles à l'eau. Le banco s'érode facilement entraînant des effondrements de maison et la paillette une fois humide se dégrade rapidement par pourrissement. Cette situation est aggravée par la durée de submersion en cas d'inondation importante. Avec les fortes pluies enregistrées ces dernières années, on assiste à des inondations pluviales aggravées par celles dues au débordement des cours d'eau dans le bassin versant. Il s'ensuit comme conséquence une destruction de plus de 45 % des habitations souvent faites de façon à répondre à la pauvreté de la couche concernée. Dans l'arrondissement de Kassakou par exemple, il a été remarqué que les cases qui sont tombées (photo 7) sont en terre de barre, apparemment sans soubassement et sans poteau.



Photo 7: Habitation écroulée dans le village de Kassakou
Prise de vue : Koumassi, 2012

En outre, il est remarqué que l'ouvrage routier réalisé draine l'eau dans le village, ce qui entraîne la destruction des cases qui côtoient le chemin de l'eau puisqu'ils sont construits en matériaux précaires. Cette situation occasionne parfois des pertes non négligeables en vies humaines.

De plus, les populations du bassin versant de la Sota sont habituées à des constructions en paille et en terre de barre. Elles devraient subir l'effet des inondations. Les fondations des habitations ne résistent pas longtemps à des hauteurs de pluies exceptionnellement élevées et à des vents très violents.

Ainsi, à Malanville, le dépouillement des fiches de recensement et des informations recoupées auprès des autorités locales donnent :

- ✓ 7217 personnes directement sinistrées du fait de la destruction de leurs habitations soit environ 5 % de la population ;
- ✓ 717 ménages sont concernés avec 148 femmes enceintes, 90 femmes allaitantes et 1118 enfants de moins de cinq ans dont 641 garçons et 477 filles ;
- ✓ le dénombrement des jeunes de 15 à 24 ans n'est pas exhaustif mais sur un site visité, plus de 70 jeunes de cette tranche d'âge vivaient en pleine promiscuité avec les autres à cause de l'insuffisance de tentes ;
- ✓ trois décès ont été enregistrés par noyade.

Dans la Commune de Kandi, il a été noté :

- ✓ de nombreux hameaux ayant complètement disparu par suite de l'écroulement des cases faisant plusieurs milliers de sans-abris ;

- ✓ un déplacement massif des populations avec leur relogement dans des familles d'accueil, écoles et sites créés par les autorités locales ;
- ✓ environ 36650 sinistrés répartis dans 7328 ménages ;
- ✓ 2644 sans-abris.

Du point de vue de la santé, la température et les précipitations jouent des rôles très importants dans la formation et la propagation des différentes maladies.

Cette situation favorise la formation des larves ou parasites (16-22° C) et le développement des moustiques, dont la température optimum se situe entre 25 et 28° C, dans tout le secteur d'étude. Les variations de précipitations constatées ont conduit les communautés à être habituées aux instabilités d'une augmentation de l'humidité et d'une soumission à des expériences de sécheresse.

Alors que les variations de précipitations devraient conduire à un accroissement de phénomènes responsables de maladies diarrhéiques, les populations sont soumises à des taux exceptionnellement élevés de décès liés au paludisme, à la diarrhée et au choléra principalement chez les enfants, les handicapés et les personnes âgées dans les années de fortes hauteurs de pluies. Pendant les années de récessions pluviométriques, les populations sont soumises, en plus aux maladies traditionnelles, à des seuils critiques de cas de choléra consécutifs à des niveaux d'écoulement très bas des rivières.

L'analyse des paramètres thermométriques montre une variation positive des températures moyennes, ce qui accentue l'évapotranspiration, l'assèchement des sols, l'accélération de la formation de poussière. On assiste à une augmentation de cas de méningites, d'affections respiratoires et cardio-vasculaires et à un accroissement d'intoxications alimentaires.

Les principales maladies liées aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota sont consignées dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII: Principales maladies liées aux risques hydro-climatiques

Catégories de maladies	Maladies	Risques climatiques	Groupes sociaux les plus affectés	Tendance actuelle
Maladies hydriques ou liées l'eau	Paludisme	Inondation, forte chaleur	Enfants de 0 – 5 ans	Stationnaire
	Diarrhée	Inondation	Enfants de 0 – 5 ans, femmes enceintes	En baisse
	Onchocercose	Forte Chaleur, sécheresse	Toutes catégories	En baisse
	Dracunculose	Sécheresse	Toutes catégories	En baisse
	Choléra	Inondation	Toutes catégories	Sporadique
Maladies liées à la chaleur	Méningite cérébro-spinale	Forte Chaleur, sécheresse	Vieillards	Sporadique
	Les maladies cardio-vasculaires et cérébro-vasculaires	Forte Chaleur, sécheresse	Toutes catégories	Non connue
Les maladies respiratoires	(bronchite aiguë, bronchite)	Forte Chaleur, sécheresse	Enfants, vieillards	Stationnaire
	Les pneumonies	Forte Chaleur, sécheresse	Enfants, vieillards	En baisse
	L'asthme	Forte Chaleur, sécheresse	Enfants, vieillards	En baisse

Source : DDS Borgou Alibori, 2013

4-4-7. Discussion

La discussion faite sur l'occurrence des risques hydroclimatiques fait référence à des auteurs qui ont soit utilisé la même approche méthodologique sur les bassins versants ayant les caractéristiques différentes ou ayant au moins une caractéristique physique commune. La variabilité hydroclimatique observée dans le bassin versant s'est traduite par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes avec notamment une multiplication des risques hydroclimatiques dont les plus importants dans le bassin versant de la Sota sont l'inondation et la sécheresse.

L'analyse fréquentielle des débits journaliers maximums annuels (1960-2010) a permis d'estimer la crue qui a une probabilité sur deux à ($212 \text{ m}^3/\text{s}$), la crue décennale à ($333 \text{ m}^3/\text{s}$) et la crue cinquantennale à ($440 \text{ m}^3/\text{s}$) dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire, la crue qui a une probabilité sur deux à $181 \text{ m}^3/\text{s}$, la crue décennale à (302 m^3) et la crue cinquantennale à $408 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces valeurs caractéristiques correspondent une moyenne des quantiles obtenus selon les différentes lois retenues. Bechler et *al.*, (2000) avaient estimé la crue décennale $2110 \text{ m}^3/\text{s}$ la crue cinquantennale 2340 m^3 la crue centennale $2420 \text{ m}^3/\text{s}$ et la crue millénaire $2650 \text{ m}^3/\text{s}$ à Niamey sur le fleuve Niger. Une comparaison des débits de crue sur différente période de retour montre que les débits de bassin versant du Niger à Niamey sont neuf à dix fois supérieurs au débit de crue estimés sur les sous bassins versants de la Sota. Les différences obtenues sont dues à la différence des régimes hydrologiques et facteurs climatiques qui regnent sur les deux sous bassins versants malgré qu'ils appartiennent à un même bassin versant du Niger.

De même, Kodja (2013) a estimé dans le bassin versant de l'ouémé à Bonou les débits de crue avant et après la période de retour et conclut que les débits de pointe de période de retour de 2 ans sont $949 \text{ m}^3/\text{s}$ avant la rupture et $720 \text{ m}^3/\text{s}$ après la rupture. Les débits de crue décennale avant la rupture sont de $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1161 \text{ m}^3/\text{s}$ après la rupture.

Les hauteurs de pluies maximales estimées dans les sous bassins versants de la Sota varient entre 52 mm dans le sous bassin versant de la Sota à Gbassè et 39 mm dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri (fréquente) et entre 116 mm dans le sous bassin versant de la Sota à Gbassè et 98 mm dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Kodja (2013) avait dans le bassin versant de l'ouémé à Bonou déterminé les hauteurs de pluies maximales à 33 mm

(fréquente), 43 mm (décennale) et 54 mm (cinquantennale) et conclut que les pluies maximales responsables des inondations sont des pluies ayant une période de retour supérieure à cinq ans c'est-à-dire dont les valeurs sont supérieures à 39 mm. La cartographie des zones vulnérables à l'inondation a permis de montrer que Les zones de faible vulnérabilité à l'inondation couvrent 23 % du bassin versant et sont disséminées surtout dans la partie sud-est du bassin versant. Les zones de vulnérabilité moyenne à l'inondation correspondent aux zones à pente moyenne où le ruissellement sur les versants ne permet pas à l'eau de stagner. Ces zones occupent 38 % de la surface du bassin versant et sont localisées au nord et au centre. Les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation occupent 9 % du territoire et sont situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur de la rivière Sota et au nord du bassin versant. Saley et *al.*, (2004) ont dans le cadre de la cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'ouest de la côte d'ivoire ont montré que les zones de faible vulnérabilité à l'inondation couvrent 5 % du secteur d'étude et sont disséminés au niveau de la ligne de crête qui prolonge la Chaîne guinéenne. Les zones de vulnérabilité modérée à l'inondation correspondent aux zones à pente moyenne où le ruissellement sur les versants des massifs rocheux ne permet pas à l'eau de stagner. Ces zones sont localisées au centre et occupent 20 % du territoire. Les zones de forte vulnérabilité à l'inondation occupent 55 % du territoire. Ces zones concernent les vastes plaines sujettes à la submersion et sont situées au nord-ouest, au centre et au sud du territoire. De même, Kodja (2013) avait montré que, 47,55 % soit une superficie de 4279 m² sont faiblement vulnérables à l'inondation contrairement aux zones à forte et très forte vulnérabilité qui occupent respectivement une superficie de 3600 m² soit 39,99 % et 1121 m² soit 12,46 % de la vallée de l'Ouémé à Bonou.

Les zones à faible risque d'inondation représentent 15 % de la surface du bassin versant. Les zones à risque moyen couvrent 38 % et sont dispersées sur l'ensemble du bassin versant. Elles se rencontrent dans les secteurs à pente moyenne. Les zones à fort risque sont situées dans les plaines le long des cours d'eau. Elles occupent 25 % du bassin versant et s'étendent principalement dans le nord et l'ouest du bassin versant. Saley et *al.*, (2004) ont déterminé dans la région semi-montagneuse à l'ouest de la côte d'ivoire que les zones à risque faible couvrent 11 % du territoire d'étude et correspondent aux sommets rocheux dénudés ou peu fracturés. Les zones à risque moyen couvrent 15 % du territoire. Elles se rencontrent

dans les secteurs à pente moyenne sur les flancs des montagnes. Ces zones peuvent évoluer vers les zones à risque fort lorsque la densité de fracturation y est élevée. L'inclinaison de la pente peut les rendre instables et très vulnérables en cas de grandes pluies. En outre, les aquifères perchés cèdent parfois sous le poids de l'eau et peuvent engendrer des éboulements ou même des déplacements superficiels de matière solide (altérite). Les zones à fort risque sont situées dans les secteurs à pente moyenne ou faible, avec un couvert plus ou moins dense. Elles occupent 44 % du territoire et s'étendent principalement dans la partie centrale. Ces zones présentent un danger évident lors des crues. Les zones à très fort risque sont situées aux abords immédiats des cours d'eau et occupent 30 % du territoire. Ces zones correspondent aux plaines alluviales et aux lits majeurs des fleuves Sassandra (est) et Bafing (NO), et sont couvertes par les eaux au cours des mois les plus arrosés (juin-septembre) de la saison des pluies.

Kodja (2013) aussi dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou a déterminé les zones à faible risque couvrent 10,38 % soit 934 m², les zones à risque fort occupent 62,37 % soit une superficie de 5614 m² contrairement aux secteurs à risque très fort qui constituent 27,25 % et qui s'étendent sur une superficie de 2152 m².

Cette vulnérabilité biophysique a été complétée par la vulnérabilité sociale qui a permis de caractériser le niveau de vulnérabilité des modes et moyens d'existence des populations. La vulnérabilité des populations varie en fonction des moyens et les modes d'existence. Ainsi, les ressources les plus exposées aux risques sont l'agriculture vivrière et les ressources en eau, la biodiversité, l'habitat, etc. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents, les pêcheurs. Ainsi, les groupes sociaux dominants sont les plus affectés.

L'analyse des composantes du risque a permis de mettre en évidence l'occurrence, l'intensité et la durée des événements hydroclimatiques précurseurs des risques dans le bassin versant. De même, l'analyse des composantes physiques et météorologiques a permis de déterminer la vulnérabilité physique et socioéconomique du bassin versant. Cette vulnérabilité a permis d'identifier les différentes zones à risques d'inondation dans le bassin versant. La vulnérabilité du bassin versant varie d'une zone à une autre. De même, les populations sont

affectées différemment en fonction des risques énumérés et des modes et moyens d'existence.

Les risques hydroclimatiques ont affecté le volume et la fréquence des précipitations, avec des effets directs sur l'agriculture et la sécurité alimentaire. Ils ont engendré une réduction des disponibilités en eau et provoqué la réduction des capacités de croissance économique. Ils sont aussi porteurs de menaces liées à la prolifération des maladies affectant les animaux et à l'intensification de l'activité des ravageurs de plantes. Ils ont accru les risques pour la santé, en particulier pour les populations à faibles revenus, principalement dans les localités les plus reculées. Du reste, ils sont à la base des fluctuations de températures propices à l'avènement de nombreuses maladies vectorielles.

Tous ces effets sont de nature à accentuer la pauvreté et à aussi compromettre l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement (OMD). Particulièrement, les objectifs d'élimination de l'extrême pauvreté et de la faim, et la garantie d'un environnement durable sont plus que menacés.

Face aux impacts des risques hydroclimatiques sur les moyens et les modes d'existence, quelles sont les stratégies mises en place par les populations pour réduire ces risques?

TROISIEME PARTIE
PERCEPTION DES MANIFESTATIONS DES RISQUES
HYDROCLIMATIQUES ET STRATEGIES D'ADAPTATION DANS
BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

CHAPITRE V:

PERCEPTIONS PAYSANNES DES MANIFESTATIONS DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES

Les risques hydroclimatiques en cours sont largement reconnus par toute la communauté paysanne. Les manifestations de ces risques varient d'une localité à une autre. De même, les causes qui leur sont attribuées revêtent diverses formes. Le présent chapitre aborde les indicateurs, les perceptions et les limites des manifestations risques hydroclimatiques

5-1. Indicateurs de l'avènement des risques hydroclimatiques

A travers le suivi des comportements de certains animaux et l'observation de la phénologie certaines espèce végétale, les populations locales reconnaissent les signes annonciateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes. Selon Blanc-Pamard cité par Akindélé, (2011), les animaux possèdent des systèmes de réception plus sensibles que ceux des hommes et ressentent plus intensément les variations du temps. Ainsi, l'apparition des fleurs sur l'arbre (*Spathodea campanulata*) (photo 3 de la planche 1) » augure le retard des pluies et la baisse des rendements. Aussi le chant répété de l'oiseau [coq de pagode/ *Centropus senegalensis*] » communément appelé thiohoungo (photo 4 de la planche 1) en bariba présage la fin de la sécheresse. L'apparition des cigognes (*Ciconia nigra*) (photo1 de la planche 1) annoncent habituellement le début de la saison des pluies selon 62 % des enquêtés. Ces oiseaux apparaissent souvent entre mai et juin. Ils annoncent l'excès de pluie donc (inondation) s'ils apparaissent en grand nombre et ceci au delà du mois de Juin a indiqué 75 % de populations. La sortie abondante de l'hirondelle (*Hirondorustica*) est un grand signe annonçant l'imminence de la sécheresse. De même, lorsque le tisserin gendarme (*ploceuscucullatus*) érige son nid en basse altitude dans un bas-fond, permet de prévoir une saison très sèche donc une grande sécheresse. Par contre le nid est érigé en haute altitude dans un bas-fond ou dans une dépression ceci permet de prévoir l'imminence de l'inondation selon 69 % des enquêtés.

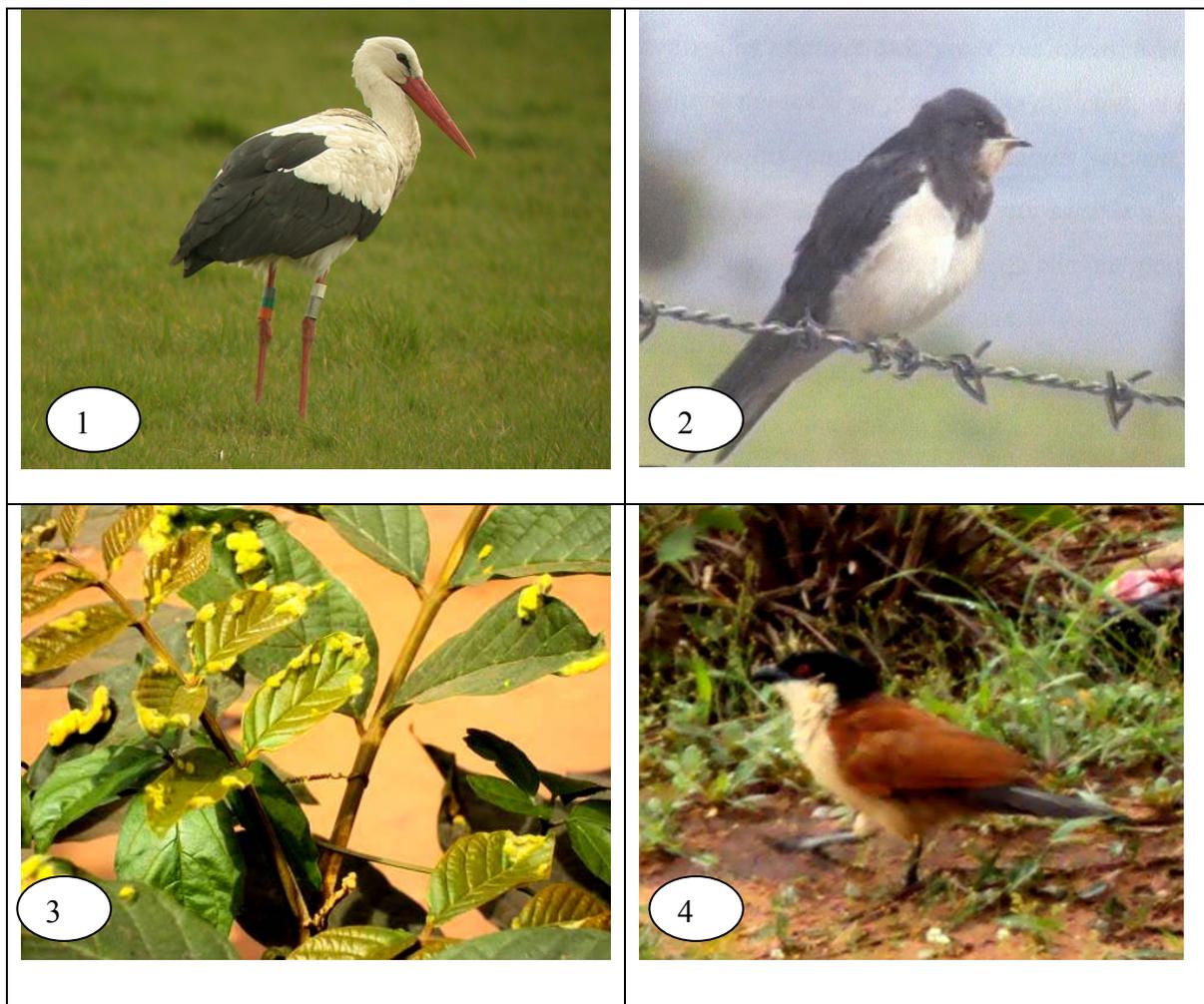


Planche 1 : Espèces indicatrices de l'avènement des risques hydroclimatiques
Ciconia nigra (1); *Hirundo rustica* (2); *Spathodea campanulata* (3); *Centropus Senegalensis* (4)

Prise de vue : Akindélé,, 2012 ; Djèvi, juillet 2013

La photo présente la Cigogne (*Ciconia nigra*) dont la présence dans le milieu d'étude indique le début de la saison des pluies. En effet, l'Europe méridionale accueille la majeure partie de la population de cigognes noires. C'est un oiseau qui fait partie des grands migrants paléarctiques. Pendant l'hiver boréal, elle se trouve dans une ceinture étroite entre le Sahel et les savanes soudaniennes, jusqu'en Ethiopie. Une population nicheuse relativement importante, mais dispersée, vit en Afrique du Sud (de la Zambie à l'Afrique du Sud et à la Namibie). Il faut signaler que la présence de cet oiseau pendant ce temps (mai et juin) dans le milieu d'étude se justifie par le fait qu'il est à la recherche d'un milieu chaud donc fuyant le froid.

5-2. Perceptions paysannes des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Les risques hydroclimatiques qui sévissent dans le bassin versant de la Sota sont largement reconnus par la communauté paysanne. A force de vivre de façon cyclique les mêmes événements des années durant, les populations du bassin versant de la Sota ont pu identifier les manifestations de ces risques hydroclimatiques dans leurs localités. La figure 48 montre la synthèse de la perception des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à exutoire de Coubéri.

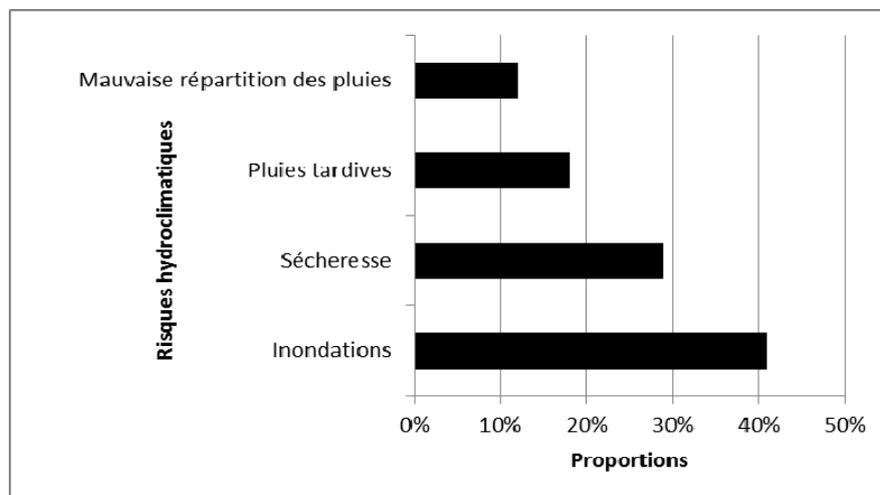


Figure 48: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Les résultats des enquêtes de terrain révèlent que les paysans identifient les risques climatiques comme suit : les inondations (41 %), la sécheresse (29 %) les pluies tardives (18 %), la mauvaise répartition des pluies (12 %). Tous ces risques ne sont pas uniformément répartis dans l'ensemble du bassin versant de la Sota. Ils varient d'un sous bassin versant à un autre.

5-2-1 Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri

La figure 49 montre la hiérarchisation de l'importance de la manifestation des risques hydroclimatiques dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri.

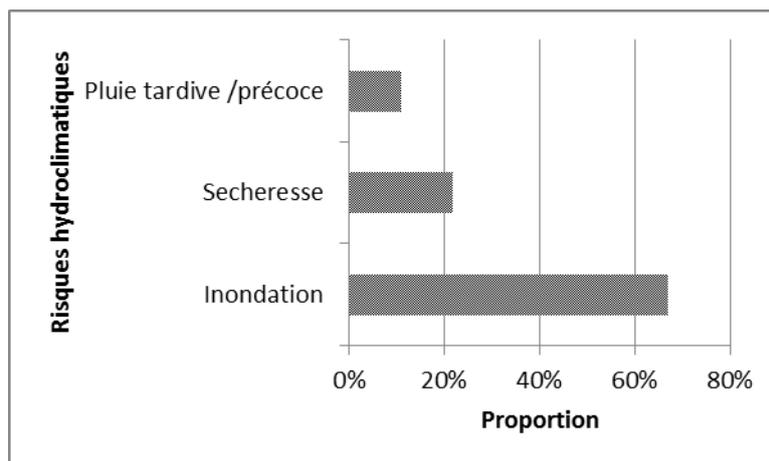


Figure 49: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à Coubéri

L'examen de la figure 49 permet de constater que, selon les populations interrogées dans le milieu réel, les risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à coubéri se manifestent par les inondations (67 %), les sécheresses (22 %), et les pluies tardives/précoces (11 %). Il est remarqué à travers leurs déclarations que les risques hydroclimatiques se manifestent surtout par les inondations le bassin versant de la Sota à Coubéri. La figure 50 indique les perceptions des populations des périodes d'inondation.

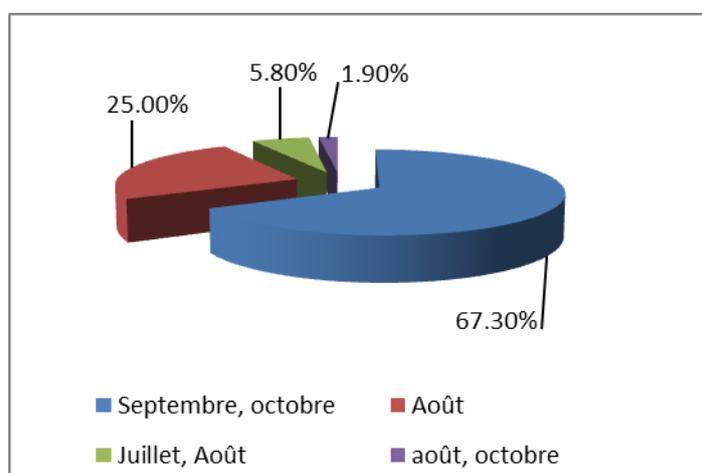


Figure 50: Perceptions des populations des périodes d'occurrence des inondations dans le bassin versant de la Sota

L'examen de la figure 50 montre que la période d'occurrence des risques d'inondation dans le bassin versant de la Sota est septembre-octobre selon 67 % environ. Cela se justifie par le fait que cette période est la plus arrosée pendant toute l'année.

Les populations ressentent aussi les incidences des risques hydroclimatiques sur leur mode d'existence. Ainsi, les inondations ont pour impacts la destruction des cultures, des habitations, des routes, etc. le tableau XXIV synthétise la perception des manifestations des inondations décrites par les populations paysannes dans le bassin versants de la Sota.

Tableau XXIV: perception endogène de l'inondation

	Inondation
Dénomination	Hourousanou en Bariba et djindji en dendi
Caractéristique	Pluie abondante, montées exceptionnelles des eaux dans les cours d'eau, dégâts dans les champs et les maisons, maladies hydriques.
Variantes	<ul style="list-style-type: none"> - Excès des eaux toute la saison des pluies. - Excès des eaux en 2 ou 3 jours de pluies sans cesse - Excès des eaux en 2 mois (début septembre à fin octobre). - Montées exceptionnelles des eaux dans les cours d'eau
Intensité	De plus en plus forte.
causes	Abondance des pluies, occupation des bas-fonds, non-respect des promesses faites aux divinités et ancêtres, abandon des sacrifices et rites cultuels, ensablement des cours d'eau.

L'analyse de tableau xxiv permet de retenir, les populations connaissent bien les différents types d'inondations qui surviennent dans le bassin versant. Elles distinguent les inondations superficielles générées par les pluies intenses et les inondations fluviales liées au débordement des cours et plans d'eau.

L'inondation est caractérisée par des pluies nocturnes et abondantes selon 90 % des enquêtés. Pour 65 % le cycle d'apparition n'est pas connu, sa survenance est toujours une surprise alors que selon 26% des enquêtés le cycle est annuel. L'encadré 2 décrit les propos de deux paysans de Madjcali sur les inondations.

Encadré 2 : Propos de deux paysans de Madjecali

"Il y a des années où de fortes pluies tombent, elles provoquent des inondations de nos champs car il pleut sur plusieurs jours sans arrêt. J'ai encore en mémoire les inondations de 1994 et de 2010 qui sont venues vers la fin du cycle des cultures. Toutes nos cultures ont donc été ravagées par cette inondation.

"Moi je me souviens qu'en 1994, j'avais abrité des parcelles de démonstration et des tests de pré vulgarisation qui sont été tous emportées par les inondation. Mais il y a des années où tout va bien".

A l'instar de ces deux paysans, 80 % de la population estime que les inondations constituent le risque hydroclimatique le plus dangereux dans le bassin versant de la Sota à Coubéri. L'immersion des champs par les eaux est synonyme de la destruction des cultures qui peuvent être emportées ou bien elles connaîtront une faible productivité. Pour 65 % des populations enquêtées, la sécheresse vaut mieux que l'inondation. Elles estiment qu'en cas d'inondation il est impossible de sortir pour aller chercher de la nourriture. Tous les biens sont détruits tandis que cela ne l'est pas pendant la sécheresse. La photo 9 montre un champ de maïs inondé dans le bassin versant de la Sota à Saah, commune de Kandi.



Photo 8: Champ de maïs inondé à Saah

Prise de vue : Koumassi, 2012

5-2-2. Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè

La figure 51 montre la hiérarchisation de l'importance de la manifestation des risques hydroclimatiques dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè.

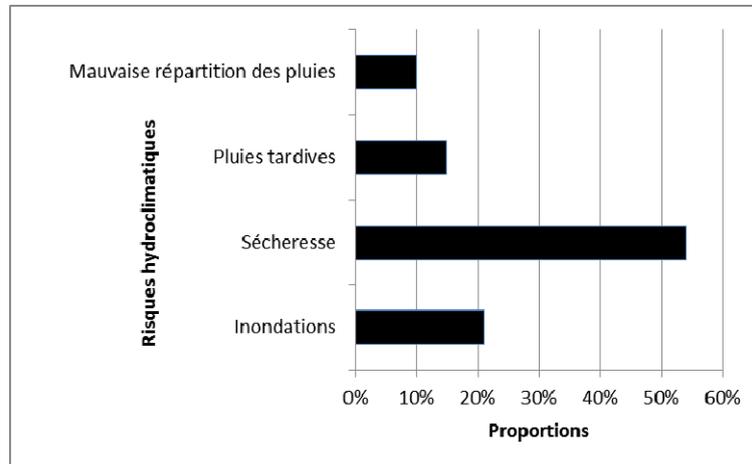


Figure 51: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à Gbassè

De l'analyse de la figure 51, il ressort que les sécheresses (54 %) et les inondations (21 %), les pluies tardives (15 %) et la mauvaise répartition des pluies (10%) sont par ordre d'importance les manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè. Il ressort que la sécheresse est le risque hydroclimatique le plus perceptible par les populations dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè. Ce risque se manifeste par des arrêts momentanés de longues durées des pluies en pleine saison pluvieuse. Il s'agit d'interruption des pluies non propice pour le développement des cultures. Il entraîne le prolongement des dates de semis des cultures comme le témoignent les propos d'un paysan dans le village de Guéné (encadré 3).

Encadré 3: Propos d'un paysan de Guéné

" Moi j'ai hérité de mes parents que pour semer le coton, on doit le faire entre le 1^{er} et le 20 juin. Mais depuis quelques années, cette période habituellement dédiée pour cette opération enregistre rarement des pluies. C'est le cas de cette année où les pluies ont commencé dans le mois de mai. Nous sommes dépassés par cette situation qui est devenue fréquente dans notre localité. Regardez, j'ai deux femmes avec cinq enfants et je n'ai plus d'autres activités que la mise en valeur agricole des terres. Est-ce-que je vais continuer par compter sur cette activité pleine d'incertitude pour répondre aux besoins de ma famille ? "

Comme ce paysan, 75 % de la population interrogée estiment que les incertitudes du démarrage des saisons culturales risquent de devenir dans le bassin versant de la Sota un phénomène structurel.

Des propos illustrant les manifestations des poches de sécheresse, on déduit que les incidences sont particulièrement les fontes de semis. Ce risque provoque également l'assèchement rapide des marres et marigots exploités selon 75 % des producteurs. En effet, pour 76 % des paysans interrogés, le bassin versant de la Sota enregistre ces dernières années une fonte des semis qui est due aux poches de sécheresse qui apparaissent souvent au mois de juin alors que les semis sont, pour la plupart du temps, réalisés avec les premières pluies de ce mois. Les observations effectuées dans les champs de coton de certains producteurs, montrent une mauvaise densité après levée. L'assèchement des sources d'eau est aussi une incidence des risques hydroclimatiques. La photo 9 montre une mare asséchée à Bouka



Photo 9: Assèchement d'une mare à Bouka

Prise de vue : Koumassi, 2012

Le tarissement des cours et plans d'eau induit de réelles contraintes pour l'approvisionnement des populations en ressource en eau tout au moins en terme de qualité. Le tableau xxv synthétise la perception des manifestations de la sécheresse dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè

Tableau XXV: Perception endogène des manifestations de la sécheresse

	Sécheresse
Dénomination	Gbéourou en bariba et konink en dendi
Caractéristiques	Absence totale de pluie, assèchement du sol, chaleur intense, vent sec, poussière, assèchement des cultures
Variantes	<ul style="list-style-type: none"> - Sécheresse intermittente : elle entrecoupe la saison pluvieuse et la saison sèche - Sécheresse ordinaire : elle est la transition entre la saison sèche (précisément grâce à l'harmattan) et la saison des pluies.
causes	déforestation, désobéissance aux prescriptions divines et ancestrales, vandalisme

De l'analyse du tableau xxv, il ressort que les populations ont une véritable connaissance du risque de sécheresse. Elles distinguent les poches de sécheresse qui entrecoupe la saison des pluies de la saison sèche appelé « gbéourou » en bariba et « Konink » en dendi différent de la saison sèche appelé « sonsarerou ». La sécheresse est d'une faible intensité dans le secteur d'étude. Elle dure 2 mois maximum et varie entre 15 à 30 jours minimum. Le phénomène de sécheresse se manifeste aussi dans l'allongement de la saison sèche. Selon 60 % des personnes ressources (sages), si la saison sèche se manifeste jusqu'au-delà du mois d'avril, alors ce phénomène serait le fruit de la désobéissance aux prescriptions divines et ancestrales.

Les causes de l'occurrence des risques sont diversement appréciées par les populations paysannes. En effet, selon 85 % des enquêtés seul le risque de sécheresse trouve ses origines dans les modifications environnementales. Loin de lier l'occurrence des sécheresses aux effets des variations climatiques, les

autochtones n'estiment que les causes seraient locales, dues au déboisement et à la destruction du couvert végétal. Par contre, les autres risques seraient liés à la colère des dieux ou à l'abandon de pratiques traditionnelles. Les vents violents, le retard des pluies et les inondations sont perçus comme la manifestation de la colère des dieux.

5-2-3. Limite de la perception des risques hydroclimatiques

La première limite porte sur les canaux ou supports de conservation et de transmission des savoirs. Ils sont souvent transmis de bouche à oreille. Ce mode ne garantit pas la fiabilité des informations puisque, dans le contexte de tradition fondée sur l'oralité, l'orateur pourrait consciemment ou inconsciemment déformer l'information. En effet, le support de conservation des savoirs utilisé ne garantit pas la fiabilité des informations. L'information transmise oralement peut être facilement déformée par le détenteur pour plusieurs raisons : soit consciemment ou inconsciemment. Ainsi, ce mode de transmission et de la conservation des connaissances endogènes sont de nos jours peu fiables. Quant aux interprétations des indicateurs, elles s'avèrent souvent difficiles excepté pour les initiés. L'interprétation des indicateurs nécessite une innovation car il y a de nouveaux paramètres ou des modifications dans l'apparition des indicateurs surtout avec les variations hydro climatiques

Par ailleurs, il y a de nouveaux paramètres que les données ancestrales n'ont pas pris en compte lors de l'élaboration des savoirs endogènes. A titre d'exemple, les hérons garde-boeuf peuvent être présents dans le secteur d'étude sans qu'il n'y ait sécheresse. Le coucal peut crier pendant plusieurs heures sans aucune goutte de pluie (Djevi ; 2010). De ces limites, il se dégage une question : est-ce qu'on peut se contenter seulement des perceptions paysannes seules dans les prévisions des évènements hydroclimatiques extrêmes au regard de la variabilité hydroclimatiques qui s'observe dans le bassin versant de la Sota ?

5-2-4. Discussion

Les paysans disposent d'un dispositif d'indicateurs lesquels elles perçoivent les manifestations des risques hydroclimatiques. C'est à travers ce modèle qui marche tout comme un système d'alerte, composé de plusieurs types d'indicateurs les paysans interrogés se renseignent les manifestations des risques hydroclimatiques.

Ces résultats sont aussi obtenus par Djevi (2013) dans le département de la Donga où il a trouvé plusieurs indicateurs permettant d'organiser la vie socio-économiques et culturelles des populations. En effet, pour cet auteur, les comportements ou mouvement de certaines espèces comme la *Ciconia nigra*, *Streptopelia senegalensis*, *Hirundo rustica*, etc. permettent de prévoir la pluie ou la sécheresse. De même, l'analyse de la phénologie de l'*Hyphaene thebaica*, le *Parkia biglobosa*, *Adansonia digitata*, etc. est interprétée dans la prévision des saisons. De même, selon les travaux de Ozer *et al.*, (2013), sur le plateau d'Abomey, les éléments annonciateurs du début ou de fin des événements climatiques extrêmes existent pour la plupart des risques. C'est ainsi que le « ciel noir annonçant une grande pluie, mais les nuages se dispersent et il ne pleut pas » annonce des vents violents ; « apparition des fleurs sur l'arbre Adada (*Spathodea campanulata*) » augure le retard des pluies et la baisse des rendements ; « le chant de l'oiseau wututu [coq de pagode / *Centropus senegalensis*] » présage la fin de la sécheresse. Mais il faut remarquer que les indicateurs énumérés par les populations comportent des limites. c'est ainsi que parfois il y a une confusion entre les indicateurs des saisons et ceux des risques hydroclimatiques.

Conclusion partielle

Les populations dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri distinguent et hiérarchisent les manifestations des différents risques hydroclimatiques. Plus de 65 % des paysans disposent d'un dispositif d'indicateurs qui leurs permettent de prévoir l'avènement ou non d'un risques. C'est à travers ce modèle qui marche tout comme un système d'alerte, composé de plusieurs types d'indicateurs (biophysiques, astraux, spirituels, etc.) que 65 % des paysans interrogés se renseignent sur les saisons à venir. Compte tenu du fait que cette connaissance bien qu'empirique continue toujours à être utilisée par les paysans, ces derniers se fondent alors sur ces connaissances et savoirs ethno-climatologiques pour organiser leur vie quotidienne, tant au plan social, économique que culturel.

CHAPITRE VI:

STRATEGIES D'ADAPTATION AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Les populations du bassin versant de la Sota ont développé des stratégies d'adaptation. Par ces stratégies, les paysans ont pu réduire les effets des risques hydro-climatiques. Ces stratégies d'adaptation dans le bassin versant peuvent être classées en deux catégories : les stratégies endogènes et les stratégies exogènes. Les stratégies endogènes sont celles développées par les paysans eux même tandis que celles exogènes regroupent celles des politiques agricoles nationales, des services de vulgarisation agricole. Ce chapitre présente les différentes stratégies d'adaptation qui sont développées pour réduire la vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota.

6-1. Stratégies institutionnelle, juridique et organisationnelle de gestion des risques dans la Sota

La gestion des risques hydroclimatiques est encore peu pratiquée en Afrique. Les organismes météorologiques, hydrologiques et climatiques nationaux et sous régionaux sont souvent coupés des activités en cours dans le domaine du développement et sont relativement sous-équipés. Cependant, la prise de conscience du fait que les phénomènes extrêmes peuvent compromettre notablement les investissements visant à réduire la pauvreté a incité à investir davantage dans la collecte des données, la recherche et les services climatologiques (CCNU, 2010).

Au Bénin, depuis quelques années, face à l'ampleur des risques hydroclimatiques et aux conséquences de plus en plus désastreuses, les politiques ont mis en place des structures de gestion des risques et catastrophes. Au début, il s'agissait d'une gestion passive, fondée sur une transmission culturelle du risque par le biais de moyens très traditionnels (légendes, chansons, etc.). De nos jours, la gestion du risque se base de plus en plus sur des connaissances et des techniques scientifiques.

La gestion des risques hydroclimatiques consiste à utiliser des données climatologiques pour faire face aux incidences que les variabilités climatiques

risquent d'avoir sur le développement et la gestion des ressources. Elle couvre une large gamme d'actions possibles (systèmes de réponse rapide, répartition des risques par la diversification, règles d'allocation dynamique des ressources, instruments financiers, conception des infrastructures et renforcement des capacités). Le bassin versant de la Sota, ne dispose pas d'une stratégie particulière de gestion des risques hydroclimatiques. Les dispositions mises en place pour la gestion des risques hydroclimatiques s'intègrent dans un cadre général de gestion des risques et catastrophes élaboré au plan national. C'est une démarche organisée en plusieurs phases qui se succèdent dans le temps, en impliquant progressivement les différents acteurs du milieu.

6-1-1. Cadre institutionnel, juridique et organisationnel de gestion des risques et catastrophes au Bénin

D'un point de vue juridique, le besoin de se protéger contre les risques majeurs a été apparu au Bénin en 1985. En effet, jusqu'en 1985, il n'existait aucun texte régissant la gestion des risques et catastrophes au Bénin. Cette gestion s'effectuait suivant les convenances de chaque structure ministérielle et dans la mesure des disponibilités budgétaires. Ce vide juridique a été comblé en 1985 par l'adoption d'un document juridique en matière de gestion des risques et catastrophes. C'est ainsi qu'est né le Comité National pour la Protection Civile (CNPC). En effet, c'est par décret n°85-112 du 15 avril 1985 que le gouvernement s'est doté d'un Comité National de Protection Civile, portant création, composition attributions et fonctionnement du Comité National pour la Protection Civile) dont la finalité recherchée est de mieux prévenir, réduire et gérer les catastrophes qui ont des répercussions humaines et financières énormes. Placé sous l'autorité du Ministère de l'Intérieur et de la Sécurité Publique (MISP), dont le Secrétariat Permanent est assuré par la Direction de la Prévention et de la Protection Civile (DPPC), créée par Arrêté n°98-a » du 30 juillet 1998 qui a, entre autres, pour missions de:

- tout mettre en œuvre sur toute l'étendue du territoire pour prévenir les sinistres et alerter à temps les autorités et les populations concernées;
- Informer, éduquer et sensibiliser les populations sur les dangers et former les personnels de la Protection Civile;

- élaborer les plans de sauvegarde et de protection des populations en cas de sinistres et de catastrophes naturelles;
- évaluer les besoins des populations sinistrées;
- Centraliser et coordonner les secours à apporter aux populations.

Les membres du CNPC sont composés de tous les autres ministres auxquels s'ajoutent les préfets. Il est représenté :

au niveau du Département par le Comité Départemental de Protection Civile;

au niveau de la Commune par le Comité Communal de Protection Civile;

au niveau du village ou du quartier de ville par le Comité local de Protection Civile.

Le CNPC a été complété en 1987 par le plan ORSEC dont les conditions et les modalités d'organisation et de fonctionnement sont fixées par le décret n° 87-408 du 7 décembre 1987, portant organisation des secours en cas de sinistre ou de catastrophe au Bénin (Plan, ORSEC). Il a été conçu dans le souci d'assurer une plus grande efficacité dans l'intervention des Comités de protection civile à différents niveaux (comités locaux, comités de District et comités provinciaux). A cet effet il désigne les autorités appelées à jouer un rôle actif au sein desdits comités et fixe la mission de chacune d'elles.

A ces deux structures, s'ajoutent d'autres lois et décrets tels que :

- la loi 97-029 du 15 janvier 1999, portant organisation des communes en République du Bénin ;
- le décret 2001-093 du 20 février 2001, fixant les conditions de l'élaboration de l'audit environnemental en République du Bénin ;
- le décret 2001-094 du 20 février 2001, fixant les normes de qualité de l'eau potable en République du Bénin ;
- le décret 2001-095 du 20 février 2001, fixant la création de cellules environnementales en République du Bénin ; et
- le décret 2001-109 du 4 avril 2001, fixant les normes de qualité des eaux résiduaires en République du Bénin.

Pour mieux faire face aux risques et catastrophes, de plus en plus récurrents, les pouvoirs publics ont procédé à l'actualisation des textes et dispositions régissant la gestion des risques et catastrophes. Ainsi, Le CNPC a été remplacé en 2011 par la plate-forme nationale de réduction des risques de catastrophe et d'adaptation au changement climatique. En effet, les dispositions du décret n° 2011-834 du 30 décembre 2011 portant création, composition, attributions et fonctionnement de la

plate-forme nationale de réduction des risques de catastrophe et d'adaptation au changement climatique en République du Bénin placée sous la présidence du Ministre de l'Intérieur, de la Sécurité Publique et des Cultes. Elle est composée de tous les autres ministres, les représentants des Institutions d'Etat impliquées dans la gestion des situations d'urgence, les préfets de départements et leurs représentants, des Agences des Systèmes des Nations Unies, les partenaires au développement, de l'association nationale des communes du Bénin, de la croix rouge Béninoise, des Associations et Organisations Non Gouvernementales à vocation humanitaire.

La plate-forme a pour mission de :

- promouvoir l'intégralité de la prévention des risques et de la gestion des catastrophes, dans les politiques, plans et programmes de développement durable et de réduction de la pauvreté ;
- définir les orientations stratégiques et de valider les programmes établis dans le cadre de la réduction des risques de catastrophes ;
- faciliter la mobilisation des ressources nécessaires à la mise en œuvre des programmes et projets de prévention des risques, de gestion des catastrophes, de réhabilitation et de développement post- catastrophes.

Dans la même dynamique d'actualisation des instructions de gestion des risques et catastrophes, la DPPC fut remplacée par l'Agence Nationale de Protection Civile (ANPC) dont le décret de création N°2012-426 06 Novembre 2012 fixe les attributions, l'organisation et le fonctionnement. Régie par les dispositions de la loi n°94-009 du 28 juillet 1994 portant création, organisation et fonctionnement des Offices à caractères social, culturel et scientifique, l'ANPC est un établissement public à caractères administratif et social, dotée de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Elle est placée sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur, de la Sécurité Publique et des Cultes. Elle a pour mission, de contribuer à la mise en œuvre de la politique gouvernementale en matière de réduction des risques de catastrophes. Dans ce cadre, elle est chargée de :

- prévenir tout risque de catastrophe sur l'ensemble du territoire national ;
- assurer la formation des cadres du personnel de la protection civile et des collaborateurs bénévoles ;
- préparer les autorités politico administratives, de même que les populations, à faire face aux risques majeurs ;

- assister les Comités de Protection Civile dans la mise en œuvre des mesures de prévention et d'assurer la maîtrise des événements dommageables;
- mettre en œuvre le Plan National d'Organisation des Secours en cas de catastrophe (Plan ORSEC) ;
- centraliser et coordonner les secours à apporter aux populations sinistrées ;
- coordonner l'action des équipes d'intervention spécialisées, en cas de crise ;
- veiller à la préservation de l'environnement ;
- préparer et organiser des exercices de simulation ;
- assurer la protection des réfugiés et participer à la réglementation de leur séjour en République du Bénin.

Dans une approche préventive et pour mieux coordonner les actions en cas de crise, le Bénin depuis 2009, fait l'expérience du Plan de Contingence, pour assurer au mieux la préparation de la réponse aux urgences. Le Plan National de Contingence est conçu pour faire face en temps réel ou à court terme, aux crises, catastrophes, qui peuvent éventuellement affecter l'espace national béninois. Il est confectionné à partir des données de terrain collectées et de leur analyse pour mitiger et aller au secours des populations sinistrées. A travers ce plan de contingence qui reste comme un guide d'actions opérationnelles à court terme, trois différents types d'aléas identifiés à partir de l'état des connaissances sur le contexte socio politique et les phénomènes naturels qui affectent le Bénin ont fait l'objet de simulations afin de se prémunir d'un éventuel et potentiel désastre. Ce Plan National de Contingence a été élaboré avec l'appui du PNUD, puis adopté par le Gouvernement le 2 juillet 2010.

6-1-2. Processus de gestion des risques hydroclimatiques

D'une manière générale, la gestion des risques est décomposée en plusieurs phases d'analyse et d'action. Celles-ci se succèdent dans le temps en s'organisant de façon cyclique, tout en impliquant de nombreux acteurs.

- Prévision

La prévision est l'une des étapes les plus importantes dans une démarche de gestion du risque. Elle consiste à adopter puis appliquer effectivement des réglementations, normes et procédures et mettre en place des systèmes d'alerte précoce (SAP) fonctionnels en vue de réduire voire annuler la vulnérabilité des populations. Un système d'alerte précoce est l'ensemble des capacités nécessaires pour produire et

diffuser en temps opportun et utile des bulletins d'alerte permettant à des individus, des communautés et des organisations menacées par un danger, de se préparer et d'agir de façon appropriée en temps utile pour réduire le risque de dommage ou de perte. Un système d'alerte précoce comprend quatre éléments clés:

- la connaissance des risques ;
- le suivi, l'analyse et la prévision des risques ;
- la communication ou la diffusion d'alertes et de mises en garde ;
- les capacités locales à répondre à l'avertissement reçu.

Dans le cadre des risques hydroclimatiques, la prévision d'un aléa à caractère intense ne peut pas empêcher sa survenue ; mais, elle peut être un facteur essentiel en termes de dommages occasionnés. Plus la prévision est rapide, plus le temps d'anticipation est large et moins sera la hauteur des dégâts.

Dans le bassin versant de la Sota comme dans tout le Bénin, la prévision hydrométéorologique est assurée par les structures nationales:

- La Direction de la Météo Nationale (DMN) en collaboration avec l'ASECNA, elle dispose six (06) stations synoptiques, quelques dizaines de stations climatologiques et postes pluviométriques complétés par les données satellitaires.
- La Direction Générale de l'Eau (DG Eau) a pour mission, entre autres, de mettre en place et gérer le Réseau National de Surveillance Hydrologique (RNSH). Une des fonctions essentielles dudit réseau est de fournir des données fiables, en temps réel, et dont le couplage avec les informations météorologiques fournit l'ossature du système d'alerte précoce contre les risques hydrométéorologiques.

- Stratégie de gestion de crise

Dès que le risque redouté se révèle sur le terrain, les acteurs concernés par la gestion de la crise doivent se déplacer rapidement sur les lieux et agir en harmonie en appliquant les instructions dictées par la plate-forme nationale de réduction des risques de catastrophes et d'adaptation au changement climatique. En principe, les représentations de la plate-forme au niveau du village ou de quartier de ville, et les services de l'ordre qui doivent assurer l'évacuation de la population vers les centres d'accueil prévus par la collectivité où ils seront en sécurité (ces centres n'existent pas dans le bassin versant, mais ce sont les écoles, les maisons des jeunes, les églises, les mosquées qui sont utilisées). La prise en charge des sinistrés est

assurée par les services compétents de l'ANPC avec l'aide des ONG et des partenaires au développement.

6-2. Stratégies endogènes

Les populations agricoles dans le bassin versant de la Sota à l'instar de celles d'Afrique subsaharienne ont développé plusieurs stratégies pour réduire les impacts liés aux risques hydroclimatiques. Selon Baudoin (2012), les stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques ne sont pas un phénomène nouveau car les civilisations agraires du Bénin, à l'instar de toutes les civilisations agraires traditionnelles de l'Afrique subsaharienne, recèlent de connaissances et pratiques développées face aux aléas de la nature. Depuis quelques décennies, les perturbations liées aux risques hydro-climatiques sont plus rapides, plus intenses que certaines connues jusqu'à présent.

L'auto-ajustement paysan couvre une large gamme de techniques et pratiques dont l'objectif est (i) de ne pas rater le début effectif de la saison culturale afin d'éviter le stress hydrique aux phases critiques des cultures, puis (ii) d'optimiser le rendement, la récolte quel que soit les aléas durant la saison culturale. Aussi, la gestion de la saison culturale est-elle approchée à travers la compilation d'un savoir empirique sur le début de la saison pluvieuse et la pratique des semis multiples, alors que l'optimisation du rendement est recherchée à travers plusieurs techniques culturales relatives à la gestion des sols et à la sélection variétale.

6-2-1. Techniques et méthodes de culture

Les différentes techniques et méthodes de cultures développées par les populations dans le bassin versant varient d'une localité à une autre en fonction de la disponibilité ou non des systèmes d'irrigation et du degré de fertilité des sols.

Ces techniques et méthodes de cultures sont : l'irrigation et la mise en place des casiers et diguettes d'irrigation, les pompages de puits tubés, les semis à sec, précoces, répétés, échelonnés, tardifs, les rotations et associations culturales.

Le billonnage et le buttage sont surtout utilisés pour un bon drainage et le bon développement des racines. Ces deux techniques consistent à confectionner des buttes et des billons à la main, à la charrue (photo 10) ou par un tracteur. Ils permettent à l'eau de pluies collectée dans les sillons, de s'infiltrer afin d'alimenter

les cultures. Ils permettent également de maîtriser plus facilement les mauvaises herbes en donnant aux plantes cultivées un avantage de quelques centimètres de hauteur par rapport aux adventices.



Photo 10: Billonnage à l'aide de la traction animale à Nikki
Prise de vue : Koumassi, 2012

On constate de l'examen de la photo 10, que la traction animale est utilisée par les paysans pour réaliser les billons. Mais selon 61 % des paysans interrogés, les billons peuvent diminuer la cohésion du sol mais aussi l'éroder quand par exemple, la pente est parallèle au sillon. Il est surtout pratiqué dans les zones non inondables comme Nikki, Goungoun, Guéné, Ina, Gamia, etc, du bassin versant et principalement pour le maïs, le sorgho et le petit mil.

Le semis à sec aussi permet de s'affranchir des retards de pluies par rapport aux dates normales du calendrier agricole habituel du paysan. D'autres par contre, préfèrent s'assurer du démarrage effectif de la saison pluvieuse avant de faire les semis pour ne pas perdre les semences. Quant aux semis répétés, il consiste à remplacer des plantes flétries ou des graines non levées par d'autres semences.

L'association culturale est développée pour répondre aux problèmes de baisse des rendements agricoles étant entendu que la jachère de longue durée, comme le souligne Raynaut (1997), n'est plus possible dans un contexte de forte densité de population comme le cas du bassin versant de la Sota (INSAE, 2006). En effet, les agriculteurs ont développé la rotation et l'association des cultures comme stratégies permettant de diversifier les types de productions sur une même parcelle: dans le bassin versant, on relève par exemple une association d'igname, de maïs et de

niébé sur la même parcelle (photo 11). Ces mêmes cultures sont souvent succédées par les paysans d'une année/saison à une autre et sur une même parcelle.



Photo 11: Association de cultures de maïs et du gombo à N'dali
Prise de vue : Koumassi, 2013

Face aux risques hydro-climatiques répétés dans le bassin versant de la Sota, 87 % des paysans interrogés ont recours à l'extension des terres cultivées afin de répondre aux besoins alimentaires d'une population croissante. Pour cela, le défrichage et le déboisement de nouveaux espaces sont nécessaires, avec en retour, des impacts sur la fertilité et la stabilité des sols (Lanokou et *al.*, 2011). Les écosystèmes, déjà fragilisés par le déploiement de monocultures de rente depuis l'époque coloniale, sont alors soumis à la baisse de fertilité, l'érosion accélérée, la multiplication des mauvaises herbes, etc. (Mazoyer , et Roudart , 2002).

Les nouvelles pratiques agricoles répondent aux évolutions socio-politiques et économiques du XXI^{ème} siècle et à la recherche d'un revenu dans cette économie marchande, mais principalement au contexte climatique, puisque l'agriculture dans le bassin versant de la Sota est principalement pluviale, bien que les cultures irriguées se soient développées par endroit ces dernières années.

Aussi, faut-il signaler que les populations agricoles ont recours à différentes techniques qui permettent de retenir, conserver ou mieux gérer l'eau destinée à irriguer. Il s'agit pour l'essentiel du développement de diguettes, de puits turbés et de paillage (planche 1).



Puits turbés à Tombouctou



Paillage du sol à N'Dali



Casiers d'irrigation à Madjecali



Diguettes d'irrigation à Malanville

Planche 2: Quelques stratégies d'adaptation endogènes aux risques hydro-climatiques dans le bassin versant de la Sota

Prise de vue : Koumassi, 2013

De l'observation des photos de la planche 1, on remarque que les populations ont développé autant de stratégies pour réduire leur vulnérabilité aux risques hydro-climatiques. Les puits turbés tout comme le paillage du sol ont été développés par les producteurs pour lutter contre les risques de sécheresse. Quant aux casiers et diguettes d'irrigation, ils ont été réalisés pour réguler la quantité d'eau nécessaire pour l'alimentation hydrique des cultures.

Lors des investigations en milieu réel, il a été confirmé par 69 % des populations interrogées que les paysans, pour faire face aux risques hydro-climatiques, se livrent à des activités autres que l'agriculture.

6-2-2. Stratégies alternatives développées par les paysans

Outre un ajustement des pratiques agricoles à leurs évolutions, les contextes socioéconomiques et climatiques poussent aussi les producteurs du bassin versant de la Sota vers la recherche d'activités complémentaires à l'agriculture. Celles-ci

deviennent une nécessité pour faire face à la baisse des rendements (due aux pressions anthropiques et climatiques) et aux besoins financiers des ménages. Ainsi, le salariat se développe dans le milieu d'étude au sein des populations rurales, ce qui permet, comme le souligne Dietz (2004), de ne plus uniquement dépendre des rendements agricoles devenus aléatoires. Le développement du salariat contribue à répondre aux besoins financiers ainsi qu'aux aspirations de certains agriculteurs envers un nouveau mode de vie – notamment les plus jeunes. Cette recherche d'activités hors agriculture prend parfois la forme d'un exode définitif vers les villes ou les pays voisins (Nigeria, Niger, etc.) vidant alors les campagnes de leurs forces de travail principales. Il faut néanmoins souligner que la migration comme réponse récente et fréquente à la dégradation des conditions de vie en milieu rural (Johnson et al., 2006), n'est pas la seule forme de déplacement existante en milieu rural. Une forme plus ancienne de migration concerne les déplacements temporaires des hommes vers les villes pour y exercer un emploi durant la saison sèche par exemple, une forme de migration qui, selon Ouorou-Barrè (2007) et Orou-Séko (2008), est courante dans le Nord-Bénin depuis plusieurs décennies.

6-3. Stratégies exogènes

Depuis l'indépendance, l'agriculture n'a pas toujours bénéficié d'initiatives et d'actions stratégiques structurées certes, mais les multiples programmes et projets d'encadrement du monde rural ont entraîné l'introduction et la sédimentation de certains paquets et itinéraires technologiques. En effet, les techniques culturales alternatives, les techniques de conservation des bassins versants, l'utilisation d'engrais chimique et organo-minéral, utilisation de pesticides de synthèse, l'utilisation de biopesticides, lutte intégrée contre les nuisibles des cultures, sélection variétale, irrigation et culture de contre saison, sont autant de propositions d'innovations qui ont traversé le monde rural sans pour autant marquer structurellement les écosystèmes du bassin versant de la Sota, notamment en ce qui concerne l'agriculture vivrière de subsistance. Celles qui sont susceptibles de contribuer à la résilience des écosystèmes du bassin versant sont décrites ci-dessous.

6-3-1. Recours aux bas-fonds et plaines alluviales

Les bas-fonds sont progressivement mis en valeur, en réponse à la recherche de nouvelles terres (croissance démographique importante). Auparavant, ces zones

étaient évitées car les risques d'inondation étaient évidents. La baisse des hauteurs de pluies constatées dans certaines régions africaines dans la seconde moitié du XXème siècle, et la promotion des cultures de riz dans les régions soudano-sahéliennes (comme le Bénin) encouragent les agriculteurs à mettre en valeur ces zones fertiles (photo 12), malgré certaines difficultés liées à la gestion de l'eau (Issa, 2012).



Photo 12: Mise en valeur rizicole des bas-fonds à Malanville

Prise de vue : Koumassi, 2012

Les cultures maraîchères sont également présentes aux côtés des productions vivrières, ou comme cultures de contre-saison (ce sont des cultures qui se développent en saison sèche) : ces dernières permettent une exploitation des terres durant toute l'année, et non uniquement durant les saisons pluvieuses, mais leur développement nécessite un accès permanent à l'eau. C'est pourquoi les maraîchers utilisent des systèmes d'irrigation à l'aide des puits turbés d'une part et des digues réalisés par les autorités en charge du développement de l'agriculture d'autre part (planche 2).



Planche 3 : Dignes d'irrigation à Malanville et maraîchage dans un bas-fond à N'dali

Prises de vue : Koumassi, 2012

L'examen des photos de la planche 2, montre que des dispositions ont été prises pour assurer la mise en valeur permanente des bas-fonds dans le bassin versant. En effet, l'existence des nappes souterraines à faible profondeur dans les bas-fonds permet également la culture de contre-saison alimentée en eau à partir de puits ou forages tubés peu profonds. Par exemple, « Kakahaoukou » bas-fonds situé à Kotchi dans la plaine inondable du fleuve Niger (latitude : 11°51' nord ; longitude: 3°24'5 est ; Altitude : 157 m) a une nappe phréatique d'environ 5,5 m de profondeur et facilement accessible. Plusieurs puits tubés y sont ainsi réalisés comme sur la plupart des autres bas-fonds soit par les producteurs soit par le Programme d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire (PUASA) devenu Projet d'Appui à la Diversité Agricole (PADA). Le déficit hydrique a amené les paysans à chercher de nouvelles terres à mettre en culture. Selon les agriculteurs, ces terres humides sont récemment mises en valeur à cause de leur avantage à concentrer les écoulements favorisant ainsi leur mise en culture soit avec des variétés plus exigeantes en eau, soit avec des variétés à cycle plus long.

Le défi lié à l'exploitation des bas-fonds réside dans la maîtrise de l'eau, ces derniers étant très souvent inondés par les crues et les excès pluviométriques. Cependant, les populations agricoles évacuent l'eau des champs en pompant ou en ouvrant des drains pour limiter les dégâts des inondations. Mais il peut arriver que ces drains servent de lieu de passage des eaux de la Sota vers les champs en période de crue.

En dehors des bas-fonds, on enregistre la mise en valeur des plaines inondables dans le bassin versant de la Sota. Mais, ce secteur est caractérisé par une absence d'une législation et d'une réglementation et par conséquent l'absence d'une politique clairement définie en gestion des zones humides. L'activité agricole dans les plaines du bassin versant de la Sota est limitée aux périmètres rizicoles surtout celui de Malanville qui ceinture la ville en particulier vers le Nord sur la rive droite du Niger. Cette zone rizicole couvre 516 ha dont 180 ha aménagés sur lesquels sont installés 370 coopérateurs. Un projet d'aménagement de 210 ha par les chinois devrait permettre de répondre aux 700 nouvelles demandes de coopérateurs non satisfaites. Un maraîchage caractérisé par une diversité de légumes se développe de plus en

plus aux dépend de la culture de riz qui se trouve ainsi abandonnée. Les dernières statistiques indiquent que ce secteur occupe à titre saisonnier, 27,3 % de la population active de la ville de Malanville.

6-3-2. Recours aux nouvelles espèces et variétés des cultures

Le recours aux semences de variétés améliorées est utilisé pour adapter la production vivrière ou maraîchère aux risques hydroclimatiques, une caractéristique climatique habituelle dans le bassin versant de la Sota. Ainsi par exemple, dans le bassin versant de la Sota, le maïs tendait à remplacer la culture de l'igname (surtout présente au XIX^{ème} siècle) et devient la principale production vivrière à partir du XX^{ème} siècle. Cette culture est privilégiée à cause de son avantage de pouvoir s'être cultivée sur un sol moins fertile (Daane, 1997 ; Lanokou, 2013). Mais ces dernières années la riziculture tend à remplacer cette dernière (la culture du maïs) en tant que principale production vivrière dans certaines zones de bas-fonds, où le maïs ne peut être cultivé en raison des inondations : celles-ci tendent aujourd'hui à s'accroître, ce qui serait partiellement lié à la récurrence des inondations, faisant alors du développement des cultures de riz une stratégie agricole nécessaire afin de cultiver certaines terres devenues inondables.

En dehors du développement de nouvelles cultures comme stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques, de nouvelles variétés de cultures ont été semées ces dernières années. Les surfaces dédiées à ces variétés ont évolué en fonction des contraintes hydroclimatiques et des besoins ou possibilités offertes par les marchés. Des enquêtes de terrain, il a été constaté que les semences sélectionnées sont utilisées par 93 % d'agriculteurs et 20 % de la population pensent que l'adoption des variétés à cycle court et des variétés à cycle long mais résistantes est l'une des techniques de lutte contre les risques hydroclimatiques. Les variétés à cycle court ont l'avantage d'atteindre le terme de leur cycle de développement avant l'arrivée des crues et des inondations. Le tableau XXVI présente quelques variétés de maïs, de riz, de petit-mil et de sorgho produites dans le bassin versant de la Sota, la durée de leurs cycles, l'écologie de production et les critères de choix de ces variétés par les paysans.

Tableau XXVI: Quelques variétés de cultures produites dans le bassin versant de la Sota

Spéculation s	Variétés	Cycle végétatif (jrs)	Rendement moyen en milieu paysan (t/ha)	zone de production	Raisons du choix de la variété
Maïs	QPM FAABA	90	8-9	Pluvial	Rendement élevé
	Jaune d'Ina	75	5-6	Pluvial	Très apprécié comme maïs frais
	Variétés locales	120	5-7	Pluvial	Bon pour le stockage
Riz	Adiny 11	120	5-6	Irrigué dans les bas-fonds	Actuellement en disparition à cause de sa sensibilité aux maladies
	BL 19	110	5-6	Irrigué dans les bas-fonds	Actuellement en disparition à cause de sa sensibilité aux maladies
	Béris 21	90	5-6	Irrigué dans les bas-fonds	Précocité
	Nérica-L 20	110	6-6,5	Irrigué et/ou pluvial dans les bas-fonds	Taille des plants très haute leur permettant de surmonter les eaux en cas d'inondation
	IR841	120	6-8	Irrigué dans les bas-fonds	Rendement élevé, riz naturellement parfumé, plants résistant à la verse, variété actuellement très produite à Malanville
	R8 (variété locale)	80	3-4	Irrigué et/ou pluvial dans les bas-fonds	Précocité
Petit mil	Locale	45	-	Pluvial	Très précoce, moins sensible à la sécheresse base de l'alimentation
Sorgho	Locale	90	-	Pluvial	Moins sensible à la sécheresse Base de l'alimentation

Source : CARDER et enquêtes de terrain, 2013

Les paysans adoptent des variétés fournies par le CARDER à cycle court ou plus résistantes et à haut rendement. Ainsi, 85 % des producteurs affirment abandonner le maïs local de 120 jours au profit des variétés à haut rendement. Le maïs à cycle court de 75 jours est emblavé une première fois en mai pour profiter des premières pluies avant les deuxièmes semis des variétés de 90 et 120 jours qui profiteront des pluies de juin, juillet, août et septembre. Cette pratique permet aux paysans de cultiver deux fois la même spéculature au cours d'une même saison agricole. De même, les variétés de riz sensibles aux maladies sont délaissées au profit des variétés de riz plus résistantes aux risques hydro-climatiques et/ou à rendement élevés. Le petit mil de 45 jours très précoce et moins sensible à la sécheresse est aussi très apprécié, tout comme le sorgho de 90 jours.

6-3-3. Utilisation de fertilisants organiques et reboisement

Les cultivateurs ont de plus en plus recours aux fertilisants organiques dans le but d'accroître les rendements en restituant au sol la matière organique mais aussi à cause du coût élevé des engrais chimiques (Issa, 2012). Ainsi, les résidus de récolte du niébé, d'arachide ou de soja dans un système d'association de cultures, les déchets organiques et les ordures ménagères pourrissent jusqu'à la campagne agricole suivante et contribuent à améliorer la qualité des sols. Les bouses de vache, les fientes d'oiseau, les cases de termites, sont aussi utilisées comme moyens naturels de fertilisation des sols. Des paysans interrogés, 25 % ont affirmé que, pour les difficultés de transport des bouses de vache dans les champs, ils invitent simplement les peulhs transhumants, propriétaires de bœufs, à séjourner avec les animaux sur les parcelles cultivables, pendant toute la saison sèche en échange d'une partie de la récolte obtenue. Pour une production saine dans la lutte contre les insectes, les termites et les ravageurs, certaines formations surtout à Bodjécali, proposent la préparation des extraits aqueux de Neem (*Azadirachta indica*), de feuilles de papayer (*Carica papaya L.*), et d'ail (*Allium sativum*) qui est un bon indosulfant. Ces extraits aqueux sont préparés et mis au repos pendant 24 heures puis pulvérisés sur les cultures. Ces mêmes techniques ont été recensées par Issa (2012) chez les paysans du Moyen-Bénin comme stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques.

Des investigations en milieu réel, 65 % des populations interviewées ont cité le déboisement comme cause principale des risques hydroclimatiques. Cette perception des populations confirme les conclusions de Donou (2009) et Lanokou et *al.*, (2011) quand ils ont constaté que la destruction du couvert végétal comme stratégies d'adaptation aux changements climatiques réduit les capacités d'infiltration des sols et rendent plus rudes les conditions climatiques locales. C'est ainsi que 65 % des populations du bassin versant de la Sota pensent que la présence des arbres favoriserait la pluie. Ainsi on assiste de plus en plus à de plantations d'arbres fruitiers, de Néré (*Parkia biglobosa Benth.*), de Karité (*Vitellaria paradoxa C.F.Gaertn.*) comme réaction adaptative aux péjorations climatiques qui se manifestent par les hydroclimatiques. Plusieurs ONG en l'occurrence, Vie et Environnement, et le Programme PGFTR soutiennent aussi ces initiatives paysannes. Certains paysans vont aussi louer des terres dans les zones protégées et forêts classées de la Sota à cause de la fertilité des terres dans ces zones.

6-3-4. Actions menées par les structures et subventions de la production

Face aux effets des risques hydroclimatiques, la zone sanitaire de Malanville a l'habitude de conduire un projet de traitement des puits dans l'ensemble de la Commune dès le mois de juin. Quand les inondations surviennent, les activités suivantes sont menées. Il s'agit de :

- la tournée du comité dans les localités touchées pour apprécier les dégâts et soutenir les populations ;
- la sensibilisation des populations sur les comportements à éviter pour garantir une bonne santé ;
- l'aménagement de trois sites de relogement des sinistrés à Madécali, à Tomboutou et à Garou où 104 tentes sont déployées pour les sinistrés de 2012 ; le recensement des sinistrés, qui ont fait environ 733 ménages pour 2012 à la date du 17 septembre. Le comité de gestion de crise a précisé que les populations ont préféré la solution des familles d'accueil avec une forte affluence sur la ville de Malanville.

La mairie reçoit des dons des divers acteurs intervenant dans la gestion des risques hydro-climatiques. Il y a d'une part, les Préfectures du Borgou et de l'Alibori qui apportent le premier soutien, suivi du gouvernement, à travers le Ministère de l'Intérieur de la sécurité publique et des cultes et le Ministère en charge de la famille, et d'autre part, le Président de la République, à titre personnel.

Selon le Responsable de la Perception de N'Dali, malgré qu'il n'y ait pas une ligne budgétaire appelée fond d'urgences pour les catastrophes, le maire a mobilisé de l'argent sur la ligne budgétaire des indigents pour acheter des vivres et afin d'apporter les premiers secours aux populations.

En ce qui concerne les dégâts sur la route goudronnée N'Dali-Djougou, au niveau du pont de Dadou, la Mairie a fait installer à l'endroit coupé des planches en bois pour faciliter le passage.

L'équipe du CPS composée de 3 personnes (C/CPS, Assistant social et Animatrice) donnent régulièrement un appui psychosocial aux victimes.

Le gouvernement à travers l'ANPC et le Ministère de la Famille a fait des dons aux sinistrés.

Dans la Commune de Kandi, comme actions, il faut noter :

- la mobilisation de tous les acteurs de la Commune ;
- le communiqué radio pour inviter la population au calme, à la prudence avec des consignes (ne pas boire n'importe quelle eau, ne pas forcer l'accès des voies, évacuer les cases qui menacent de tomber, se rendre au centre de santé dès qu'il y a des malaises;
- les messages portés d'information sur les cas graves ;
- appui conseil aux sinistrés ; etc.

Ces différentes actions sont menées par divers acteurs à la fois étatiques et civiles d'une part, nationaux et internationaux d'autre part.

Le Programme d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire crée en 2008 à la suite de la crise alimentaire et financière sous-régionale de cette année. (PADA) et le PISJA, fournissent l'engrais sous forme de crédit et du matériel agricole. Ainsi, le PADA à travers ses subventions permet d'acquérir les motopompes d'une part et de réaliser les forages d'autre part par l'intermédiaire des GVPR. L'office National pour la Sécurité Alimentaire ONASA, joue également un rôle important dans la production du riz à Malanville surtout à la phase post - production d'achat auprès des producteurs, de décorticage et d'emballage pour la distribution dans les boutiques témoins au prix standard national

Le tableau XXVII présente quelques programmes, projets et ONG, intervenant dans la commune de Malanville pour l'amélioration des rendements, des revenus des paysans et la lutte contre les incidences de la variabilité hydro-climatique. Toutes ces structures travaillent en partenariat avec le CARDER.

Tableau XXVII: Quelques programmes, projets et structures intervenant dans le bassin versant de la Sota

Catégorie	Dénomination	Domaine d'intervention dans le bassin versant de la Sota
PADA	Projet	Appui aux producteurs agricoles, crédits, subventions
PDAVV	Programme	Subventions et octroi de prêts agricoles aux jeunes agriculteurs
PISJA	Programme	Programme d'aide aux jeunes piloté par la SONAPRA
ONASA	Office National pour la Sécurité Alimentaire	Collecte / achat du riz auprès des producteurs, décorticage et stockage dans les boutiques témoins (2 à Malanville), conditionnement et emballage.
PAHVN-PP Sota	Projet d'Aménagement Hydro-Agricole dans la Vallée du Niger. Périmètre Pilote de la Sota	Aménagement de 8 petits périmètres autonomes de 50 ha au moins pour le riz, stations de pompage par périmètre, libre exploitation en cours
ONG	GERED-ONG	Promotion de semences améliorées, lutte anti - érosive et protection de l'environnement, épargne rural et crédit

Source: Données CeCPA et enquête de terrain, 2013

La lecture du tableau XXVIII permet de constater que les programmes et projets pilotés dans le bassin versant de la Sota interviennent dans la prévention et l'adaptation aux risques hydro-climatiques. Grâce aux impacts de ces programmes et projets, les peines des populations face aux risques hydro-climatiques sont réduites. Mais ces actions pourraient être plus concrètes si tous les acteurs dans le bassin versant sont équitablement informés et impliqués dans la gestion des risques hydroclimatiques.

6.4. Suggestions

6.4.1- Actions pour le renforcement des capacités pour la réduction des risques hydroclimatiques

Le tableau XXIX, présente les actions à mener au niveau de chaque acteur socio-économique du bassin versant pour le renforcement des capacités d'adaptation aux incidences des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota.

Tableau XXIX: Synthèse des besoins en communication des différents acteurs

Types d'acteurs	Besoins en renforcement
Cultivateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Relèvement du niveau d'alphabétisation ; • information/sensibilisation sur les risques hydro-climatiques (causes, manifestations, conséquences, mesures d'atténuation et d'adaptation) et des risques agro-climatiques ; • adaptation aux nouveaux cultivars et de nouvelles techniques d'utilisation des terres.
Jeunes	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration dans les programmes de formation aux niveaux primaire et secondaire des questions sur les changements environnementaux globaux ; • formation universitaire de hauts niveaux dans les secteurs les plus sensibles (agro-climatologie, hydro-climatologie, diversité biologique, santé humaine ; • information-Education et Communication à l'endroit de la couche sociale jeune et sa mobilisation pour la protection du système climatique.
Enseignants et chercheurs	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage et formation de mise à niveau des chercheurs sur les questions des risques hydroclimatiques, de ressources en eau, de biodiversité, de santé humaine et sur les mesures d'atténuation et d'adaptation notamment dans les secteurs clés ; • innovations technologiques facilement accessibles pour les utilisateurs dans le sens de la gestion efficace des ressources naturelles, notamment climatiques (maîtrise de l'eau, variétés culturales qui s'adaptent mieux aux nouvelles conditions climatiques) ; • coopération technique et scientifique dans les domaines de risques hydro-climatiques, de la lutte contre la désertification, la protection des établissements humains à travers les institutions compétentes au niveau national, sous-régional et international ; • élaboration des programmes conjoints de recherche (faisant intervenir le secteur public, le secteur privé, les collectivités locales) en vue de

	la mise au point de technologies améliorées, peu onéreuses et accessibles à tous les usagers.
Agents techniques de l'administration des secteurs prioritaires	<ul style="list-style-type: none"> • Bonnes pratiques de collecte, de traitement, de compilation et d'archivage des données de base ; • appropriation des techniques d'alerte sur les menaces des risques hydroclimatiques sur leurs secteurs d'activité.
Cadres des institutions nationales (du Gouvernement et de l'Assemblée Nationale)	<ul style="list-style-type: none"> • Actualisation / élaboration de textes législatifs adéquats en matière de gestion des risques et catastrophes • intégration des questions de risques hydroclimatiques dans les prises de décisions en matière de développement.
Autorités locales, religieuses, leaders d'opinion, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • de la mise en place des systèmes d'alertes précoces (SAP) pour la prévention des risques d'inondation • Information sur les causes, manifestations des risques hydroclimatiques de même que les mesures d'adaptations ; • implication des acteurs dans l'élaboration des projets de développement.
Communicateurs animateurs /	<ul style="list-style-type: none"> • Formation aux techniques appropriées de diffusion des informations sur les questions de risques hydroclimatiques et sur les mesures d'adaptation et de mitigation
Opérateurs économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des questions de risques hydroclimatiques dans les plans stratégiques de développement socioéconomique

Source : *Travaux de recherche, novembre 2012*

Tous les acteurs ont un besoin en renforcement des capacités pour s'approprier la problématique des risques hydro-climatiques en vue d'une meilleure prise en compte de cette nouvelle donne dans leurs activités.

Au regard des actions déjà menées et de leurs insuffisances en matière de renforcement des capacités dans les domaines des risques hydroclimatiques et des secteurs prioritaires (agriculture, ressources en eau, biodiversité et établissements humains), les besoins prioritaires sont relatifs à l'amélioration du cadre institutionnel, au développement des mécanismes de formation des acteurs, de communication et

d'information. En outre, le transfert de nouvelles technologies appropriées appuyées par l'assistance technique est également souhaité par les différents acteurs pour une mise en œuvre effective des conventions sur les risques hydro-climatiques, la lutte contre la désertification et le maintien de la biodiversité.

6-4-2. Renforcement des capacités par secteur prioritaire

Le renforcement des capacités par secteur prioritaire et relatifs aux questions de risques hydroclimatiques sont résumés dans le tableau XXX.

Tableau XXX: Synthèse sur les besoins en renforcement des capacités par secteur prioritaire

Secteurs prioritaires	Besoins en renforcement de capacités
Agriculture	<p>Il s'agit entre autres d'activer un mécanisme de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • création de cellules locales de gestion de risques et crises hydroclimatiques et dynamisation du (PNRRC-ACC) dans le secteur agricole ; • intégration des questions relatives aux risques hydro-climatiques dans les politiques de développement agricole • formation des agents de développement rural sur la problématique de la relation climat et agriculture ; • formation des acteurs (décideurs, techniciens, paysans, autorités locales) par le truchement de la conception de projets de développement orientés sur les relations climat agriculture ; • développement de technologies (pratiques agricoles, semences ou variétés culturales adaptées au contexte de climat modifié, biotechnologie agricole, technique d'irrigation et d'économie de l'eau, appropriation des dispositifs de mise en œuvre des systèmes d'alerte rapide en situation de crises) ; • vulgarisation des savoirs locaux en matière de gestion des risques ou crise hydroclimatiques ; • suivi évaluation des projets de développement agricoles et hydro-agricoles • etc.

Ressources en eau	<p>Dans ce secteur, il s'agira d'enclencher :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un renforcement des aptitudes des services décentralisés de la Direction Générale de l'Eau à prévoir les risques et à gérer les crises hydroclimatiques ; • un renforcement des capacités en matière de prise en compte des questions relatives aux risques hydroclimatiques dans les politiques de gestion des ressources en eaux au Bénin ; • une formation des cadres techniques dans le domaine de la vulnérabilité des systèmes hydriques aux phénomènes extrêmes et sur la méthodologie de la vulnérabilité des ressources en eau aux variations hydroclimatiques ; • une élaboration de projets de gestion intégrée des ressources en eau en condition de la fréquence des phénomènes extrêmes ; • un transfert de technologie (exploitation rationnelle des ressources en eau, recyclage et traitement des eaux usées, prévision hydrologique et hydrogéologique, gestion des crises hydro-climatiques, etc.) ; • une modélisation hydro-climatique (fonctionnement hydrologique des bassins versants, fonctionnement hydrogéologique des aquifères, processus d'intrusion saline dans la zone côtière, dans les champs de captage) ; • une sensibilisation sur les risques hydro-climatiques et aux méthodes de conservation des eaux. • etc.
Biodiversité	<p>Le renforcement des capacités tourneront autour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la mise en place de cellules chargées des questions de Changements Climatiques dans leur relation avec la biodiversité ; • de la prise en compte de la problématique risques climatiques dans la gestion des ressources biologiques ; • de la formation des acteurs (décideurs, techniciens, paysans, autorités locales) en élaboration de projets intégrés de conservation des ressources biologiques en situation de climat

	<p>modifié et en méthodologie de conservation ex-situ et in situ ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • du transfert de technologie (appropriation des mécanismes de mise en œuvre des systèmes d’alerte rapide en situation de crises) ; • de la vulgarisation des savoirs locaux en matière de gestion des ressources biologiques ; • de la mise en place des systèmes d’information et d’alertes sur les effets néfastes des risques climatiques sur la biodiversité ; • de la valorisation des connaissances traditionnelles en matière de relation climat - diversité biologique ; • de l’élaboration et la diffusion en langues locales des textes de lois et règlements relatifs à la gestion de la biodiversité ; • de la valorisation des connaissances traditionnelles en matière de diversité biologique pour le renforcement des puits de séquestration du carbone ; • etc.
<p>Etablissements humains</p>	<ul style="list-style-type: none"> • vulgarisation des normes de construction dans les zones vulnérables à l’inondation ; • Intégration des questions de risques hydro-climatiques dans les plans stratégiques de développement humain ; • Formation et information des acteurs (décideurs, agents de santé, populations, autorités locales) sur les effets néfastes des risques hydro-climatiques sur les établissements humains ; • Elaboration participative et suivi-évaluation de projets de développement humain intégrant les questions de risques hydro-climatiques. • etc.

Source : Travaux de recherche, novembre 2012

Les besoins en renforcement des capacités d’adaptation à la vulnérabilité des secteurs de l’agriculture, des ressources en eau, de la biodiversité et des établissements humains aux risques hydroclimatiques concernent en priorité :

- le cadre institutionnel ;
- la formation et l’information des acteurs ;

- le transfert technologique.

Ce renforcement des capacités dans ces domaines permettrait de combler les faiblesses des actions déjà menées et d'accroître la performance des systèmes mis en place dans le cadre de l'adaptation et la mitigation des risques hydro-climatiques.

6-4-3.Perspectives pour une meilleure adaptation aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota

Pour une meilleure adaptation aux effets des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota, les actions de communication et de renforcement des capacités en matière des risques hydroclimatiques, devront comporter trois aspects sectoriels : le profil des activités et des secteurs prioritaires, les domaines thématiques de renforcement des capacités, la question spécifique de l'adaptation locale (inscrite dans celle nationale) aux risques hydroclimatiques.

Ces actions ciblées et coordonnées s'articuleront essentiellement autour de trois volets à savoir : l'information, la formation et l'assistance technique.

L'information visera principalement la diffusion de connaissance portant sur les causes, les impacts et les stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques dans toutes les Communes du bassin versant. Le but sera d'assurer une documentation et des supports actualisés et pertinents au bénéfice de la population en général et de celle des secteurs prioritaires retenus en particulier. Ce volet comportera également des actions de partage en réseau et d'échange entre les acteurs. Il s'agira par exemple d'organiser des séances de sensibilisation grande publique et des séminaires sur tous les contours des risques hydro-climatiques. Le tableau XXXI, décline les thèmes à développer pour une meilleure information des populations.

Tableau XXXI: Répertoire des actions clés à mener et indicateurs de suivi

Actions ciblées et coordonnées à mettre en œuvre	Indicateurs de réalisation
Organisation de conférences, de séminaires et d'ateliers nationaux de sensibilisation, d'information et d'échange sur les causes, les impacts et les mesures d'adaptation aux phénomènes liés aux risques hydro-climatiques	Nombre de séminaires et d'ateliers annuellement organisés et portant sur les questions des risques hydroclimatiques
Formation aux techniques de gestion durable de l'environnement des agents du Ministère chargé de l'environnement, des agents communaux, des ONGs et des agents des médias en vue d'améliorer les capacités nationales de prévention et de gestion des effets néfastes des risques hydro-climatiques	Nombre de cycles de formation exécutés à l'adresse des acteurs clés sur les questions des risques hydroclimatiques
Visites d'échange et d'informations, d'expériences, de connaissances et de savoir-faire et de travail dans certains pays de la sous régions, en ciblant des professionnels provenant des structures techniques nationales, des structures universitaires et/ou para universitaires, du secteur privé et des ONGs, pour bénéficier de leur expérience capitalisée en matière de gestion des incidences de la sécheresse et des inondations	Nombre de visites organisées pour l'acquisition des expériences dans certains pays de la sous regions et autres pays disposant d'expériences avérées sur la lutte et l'adaptation aux risques hydroclimatiques
Implication des élus locaux dans la lutte et mobilisation contre les effets néfastes des risques hydroclimatiques	Rapport d'activités menées pour la protection du climat et l'information des populations sur les risques hydroclimatiques
Constitution d'un réseau national de compétences et consolidation d'un pôle de compétences pour apporter des réponses aux préoccupations liées aux risques hydroclimatiques. Ce réseau sera basé sur la mise en œuvre de programmes conjoints de recherche, le partage de l'information, la diffusion des résultats de recherche, l'organisation de séminaires et de réunions. Au delà de l'accroissement des capacités de recherche des institutions, le réseau pourrait constituer un cadre de concertation et d'échanges pertinent répondant aux priorités du Bénin sur la problématique des phénomènes liés aux risques hydro-climatiques. Les résultats issus de ces recherches apporteraient un précieux soutien aux principaux acteurs	<p>Nombre de réseaux constitués pour la lutte et l'adaptation aux risques hydroclimatiques et nombre de Statuts et Règlements Intérieurs organisant le fonctionnement des réseaux constitués</p> <p>Rapports sur les activités réellement menées</p>

du processus de développement national	par les différents réseaux constitués
Mise en place d'un mécanisme pour l'amélioration et le renforcement de la communication, de la coordination et synergie entre toutes les actions de renforcement des capacités initiées par l'Etat, le secteur privé, les ONGs, les institutions nationales, les partenaires techniques et financiers	Existence ou mise en place d'un mécanisme fédérateur des initiatives sur la question des risques hydro-climatiques
Elaboration de stratégies pour le développement de l'expertise et des compétences nationales et locales en matière de gestion des phénomènes liés aux risques hydro-climatiques	Document de stratégie nationale pour la lutte et le développement de l'expertise nationale sur la problématique des risques hydroclimatiques
Création d'un mécanisme de mobilisation nationale des ressources financières au profit des politiques, actions, programmes et projets de renforcement des capacités dans le domaine de la gestion des phénomènes liés aux risques hydro-climatiques	Part du budget national affectée pour la réalisation des stratégies de lutte et d'adaptation aux risques hydroclimatiques
Mobilisation de ressources financières pour appuyer la mise en œuvre de programmes visant à lutter contre les risques hydro-climatiques et atténuer les effets des phénomènes extrêmes	Volume et disponibilité des fonds nécessaires pour mener à terme tous les projets liés aux risques hydroclimatiques
Création d'un Fonds National spécial destiné à la mise en œuvre des activités prévues dans le plan d'actions ciblées et coordonnées pour la gestion des phénomènes liés aux risques hydro-climatiques	Part du budget national et apport des différentes composantes nationales pour la constitution du fonds
Organisation des forums qui réunissent des climatologues, des hydrologues, des météorologues et autres. Ces forums permettront de comprendre davantage les liens et la compréhension mutuelle entre chercheurs et utilisateurs finaux de prévisions saisonnières et donneront de l'impulsion à la mise en œuvre de mesures d'adaptation	Comptes rendus ou rapports périodiques des forums réalisés et réunissant les hydro-climatologues et autres acteurs du domaine des risques hydroclimatiques
Implication effective d'Organisations Non Gouvernementales et des populations locales, et en particulier des utilisateurs des ressources, notamment des cultivateurs et des organisations qui les représentent, en faisant une place aussi large aux femmes qu'aux hommes, lors de la planification des politiques, à la prise	Nombre d'acteurs impliqués (voir liste de présence et les rapports sanctionnant les séances de travail)

des décisions ainsi qu'à la mise en œuvre et à l'examen des programmes d'action nationaux pour la lutte contre les risques hydro-climatiques	
Organisation des campagnes de sensibilisation destinées au grand public pour promouvoir, de façon permanente, l'accès du public aux informations pertinentes, ainsi qu'une large participation des acteurs aux activités d'éducation et de sensibilisation	<p>Nombre de campagnes de sensibilisation organisés par an</p> <p>Nombre de séances de sensibilisation organisées</p> <p>Nombre de conventions ou d'extraits de conventions distribué</p>
Mise au point des programmes participatifs pluridisciplinaires qui intègrent la sensibilisation aux problèmes de risques hydroclimatiques dans le système d'éducation et dans les programmes d'enseignement extrascolaire, d'éducation des adultes et élaboration d'outils didactiques centrés sur la problématique des risques hydro-climatiques et à insérer dans les programmes scolaires et universitaires appropriés	Nombre d'outils didactiques réalisés sur la question des risques hydro-climatiques
Appuis techniques et financiers (système de crédits) aux investisseurs privés et aux associations ainsi qu'aux opérateurs économiques publics dans leurs projets de conservation et d'exploitation durable des ressources biologiques et de lutte contre les risques hydro-climatiques	<p>Nombre d'accords d'appui technique et financier signés avec les ONGs et les groupes organisés œuvrant pour le renforcement des capacités, la lutte et l'adaptation aux risques hydroclimatiques</p> <p>Accusés de réception de matériels techniques ou de fonds</p>

Source : Travaux de recherche, février 2013

La mise en œuvre de ces actions nécessitera la mise en place d'un mécanisme pour une assistance technique avérée. Cette assistance technique consistera à mettre en œuvre un dispositif d'expertise pour accompagner les initiatives allant dans le sens de la protection du climat. Il s'agira de créer des mécanismes pour un appui logistique et le renforcement des moyens institutionnels à la gouvernance de l'environnement hydro-climatique.

Cette assistance technique devra s'employer à promouvoir le renforcement des capacités :

1. en créant des services d'appui et de vulgarisation et/ou en les renforçant, pour une diffusion plus efficace des méthodes pertinentes, et en formant des animateurs et des membres des organisations rurales aux méthodes d'informations actives sur les risques hydroclimatiques ;
2. en dotant les structures de recherche sur l'hydro-climatologie des moyens techniques et financiers en appuyant la formation des chercheurs de ces structures, des décideurs, des gestionnaires ainsi que du personnel chargé de la collecte et de l'analyse des données, de la diffusion et de l'utilisation des informations sur les risques hydro-climatiques ;
3. en appuyant la mise au point du matériel éducatif et de sensibilisation du public, et ce dans les langues locales ;
4. en soutenant les actions d'élaboration d'outils didactiques centrés sur les questions des risques hydro-climatiques à insérer dans les programmes scolaires et universitaires appropriés ;
5. en appuyant les initiatives allant dans le sens du renforcement des capacités aux échelles locale et nationale.

Conclusion

Le bassin versant de la Sota, à l'instar de tous les bassins versants du Bénin en particulier et de toute l'Afrique de l'ouest en général, a toujours subi la variabilité hydroclimatique se traduisant par une alternance de périodes sèches et périodes humides. Les périodes sèches se caractérisent par une diminution des précipitations qui se traduit par une baisse des écoulements de près du triple sur l'ensemble du bassin versant (Le Barbe et al. 1993). Il a été observé sur la période 1965-2008, une baisse annuelle des précipitations de 2 à 5 % sur le bassin versant entre la période de 1970-2008 par rapport à 1968-1970. De même, les écoulements de surface ont baissé d'environ 9 % sur l'ensemble du bassin versant.

La variabilité hydroclimatique observée dans le bassin versant s'est traduite par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes avec notamment une multiplication des risques hydroclimatiques dont les plus importants dans le bassin versant sont l'inondation et la sécheresse.

L'analyse des aléas responsables des risques dans le bassin versant a permis de constater que 50 % des stations sur le bassin versant sont frappées par des sécheresses extrêmes entre 1965-2008. De même, les sécheresses les plus persistantes survenues au cours cette période sont formées de trois, quatre et cinq années sèches consécutives. En effet, avant 1970, les sécheresses étaient peu fréquentes et touchaient une infime portion du bassin versant. L'après 1970, est caractérisé par l'augmentation des fréquences et de l'intensité des épisodes de sécheresses touchant souvent la majorité des stations. Les communes les plus touchées par la sécheresse extrême sont celles de Kandi et Ina.

Les différents paramètres hydroclimatiques, pédologiques et d'occupation du sol ont permis de cartographier aussi bien la vulnérabilité biophysique à l'inondation que le risque d'inondation du bassin versant. L'analyse cartographique a permis de déterminer les niveaux de vulnérabilité biophysiques et du risque d'inondation dans le bassin versant. Ainsi par exemple, les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur du cours d'eau du bassin versant. De même, les zones à fort risque sont situées dans les plaines le long des cours et plan d'eau, Elles se localisent principalement dans le nord et l'ouest du bassin versant. Ces zones présentent un danger évident

lors des crues. Les zones à très fort risque sont situées aux abords immédiats des cours d'eau correspondent aux plaines alluviales et aux lits majeurs des rivières.

Cette vulnérabilité biophysique a été complétée par la vulnérabilité sociale qui a permis de caractériser le niveau de vulnérabilité des modes et moyens d'existence des populations dans les différentes zones agro-écologiques.

Ces risques hydroclimatiques ont des conséquences directes et indirectes incalculables sur les modes et moyens d'existence des populations. Les populations majoritairement agricoles pratiquent une agriculture pluviale dépendante des aléas hydroclimatiques, ce qui les rend plus vulnérables aux caprices des aléas hydroclimatiques. La vulnérabilité des populations varie en fonction des moyens et les modes d'existence. Ainsi, les ressources les plus exposées aux risques sont l'agriculture vivrière et les ressources en eau, la biodiversité, l'habitat etc. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents, les pêcheurs. Ainsi, ce sont les groupes sociaux dominants qui sont les plus affectés. Ils sont à la fois les plus vulnérables au point de vue socio-économique et les plus exposés aux risques climatiques.

Les perceptions des risques hydroclimatiques par les populations les amènent à développer des stratégies d'adaptation pour réduire leurs vulnérabilités. Ces stratégies passent par l'amélioration des techniques et les méthodes de culture et la promotion des activités non agricoles génératrices de revenus. Ces stratégies sont appuyées ou complétées par les mesures d'accompagnement des pouvoirs publics et les partenaires à divers niveaux, mais faut-il le souligner la contribution des connaissances endogènes des paysans au développement des stratégies d'adaptation est beaucoup plus élevée que l'appui technique et institutionnel exogène.

Les scénarios climatiques prévoient encore une baisse plus accentuée des niveaux de pluviométrie et une augmentation des températures (de + 2°C d'ici 2020). Si cette tendance se confirmait, les effets de la variabilité hydroclimatique vont s'accroître et le bassin versant sera en permanence soumis aux risques liés à la pluviométrie aléatoire et insuffisante marquées par les inondations et les sécheresses successives dont la fréquence semble croître de plus en plus, aux vents violents de plus en plus fréquents dans le bassin versant. L'occurrence des phénomènes

hydroclimatiques extrêmes et la diversité de leurs conséquences font peser de véritables menaces sur les modes et moyens d'existence des populations.

Ainsi donc, il urge de sélectionner les meilleures options d'adaptation qui sont des processus primordiaux dans l'adaptation aux risques hydroclimatiques. Ceci nécessite une prise en considération de plusieurs critères. La réduction des risques passe par :

- l'élaboration des plans de prévention des risques (PPR) pour les zones exposées aux risques hydroclimatiques les plus forts. Ceci permettra de faire connaître les zones à risques aux populations et aux aménagistes;
- le renforcement des capacités d'adaptation des paysans par les structures publiques et privées d'appui au développement agricole (ONG, CARDER, Projets de développement...);
- l'introduction d'autres stratégies de gestion de l'eau qui ont été efficaces ailleurs sous les mêmes conditions climatiques telle que la GIRE.
- l'appui aux producteurs pour renforcer les stratégies jugées satisfaisantes en vue de leur diffusion ;
- la mise au point et la valorisation de variétés résistantes non seulement au stress hydrique et à la hausse des températures mais aussi satisfaisant les exigences organoleptiques et de stockage des paysans ;
- la promotion des cultures irriguées accompagnée du paquet technique et technologique nécessaire moins coûteux ;
- l'actualisation, à partir de recherches et de simulations, des périodes de semis des principaux cultivars ;
- la vulgarisation d'espèces animales et végétales les mieux adaptées aux conditions hydroclimatiques,
- l'acquisition et l'installation des radars météorologiques dans les zones à fort risque d'inondation. Les données issues des radars météorologiques permettent de localiser et de suivre des champs de précipitation pour les besoins hydrologiques de la prévision et de l'annonce des crues. Il s'agit de détecter et d'évaluer des situations de risque et de fournir des éléments d'aide à la décision. Ils ont en général une portée efficace de 100 km ;
- l'élaboration des normes de construction dans les zones à risque d'inondation afin de doter les communes vulnérables et leurs populations des normes qui fixent les

règles de construction et de l'aménagement de l'environnement immédiat du bâti dans les zones à risque élevé ;

- l'élaboration ou actualisation des plans de contingence opérationnels dans les communes les plus vulnérables aux risques hydroclimatiques afin de renforcer les capacités de prévention et de préparation de la réponse aux risques hydroclimatiques en vue de minimiser les dommages de façon tendancielle.

En somme, malgré les difficultés dues au manque de couverture spatiale et de l'hétérogénéité temporelle des données utilisées. Cette recherche a permis de mettre en évidence la variabilité du climat, de développer une méthode d'intégration des données pour l'évaluation de la vulnérabilité des populations face aux risques hydroclimatiques dans un contexte local et la faiblesse des capacités d'adaptation des populations.

Perspectives

Les risques hydroclimatiques sont des phénomènes complexes qui nécessitent une analyse approfondie, souvent qualitative que quantitative des différentes variables, indices ou autres informations utilisées pour les caractériser. C'est ainsi que d'autres perspectives de travail s'offrent à nous. Elles consistent à introduire d'autres variables climatiques afin de prendre en compte d'autres facteurs pour améliorer les modèles d'analyse des risques hydroclimatiques actuels et futurs. En effet, le développement croissant des satellites qui permettent d'espérer une acquisition d'images de résolution spatiales plus fines (~3 m pour RADARSAT-2) et des capteurs multi polarisation, il est possibles d'envisager des cartes d'inondation et le calcul des indices de sécheresse (VCI VPI par exemple) précis. Ainsi d'autres champs de recherche se dégagent pour la suite des travaux de recherche: (i) La caractérisation des risques climatiques actuels et futurs à partir des scénarii climatiques; et (ii) Utilisation des SIG et la télédétection pour le suivi et gestion des risques climatiques

Bibliographie

1. ACIDI, PNUD, (2006) : Réalisation des objectifs de développement du millénaire dans les zones arides du Monde, Groupe de réflexion 'Impératifs de développement pour les zones arides', version provisoire pour discussion
2. ADEJUWON, J. (2003): Food security, Climate variability and Climate change in Sub-Saharan West Africa, AIACC project – AF 23, 137 p.
3. ADGER, W NEIL, ARNELL, N. & TOMPKINS, E., (2005): Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2), pp.77-86.
4. ADGER, W.N. et KELLY P.M. (1999): «Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements». (IPCC Special Issue on Adaptation to Climate Change and Variability). *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 4, no 3-4, p. 253-266.
5. AFOUDA F. (1990) : L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat nouveau régime, Univ. Paris IV (Sorbonne), Institut de Géographie. 428 p.
6. AFOUDA, A., NDIAYE T., NIASSE M., FLINT L., MAMOUDA MOUSSA NA ABOU, PURKEY D. (2007) : Adaptation aux changements climatiques et gestion des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Rapport de synthèse. <http://endaenergie.files.wordpress.com/2008/04/adapt.pdf>
7. AGO E.E., PETIT F., OZER P., (2005) : Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin) , in *Geo-Eco-Trop*, vol. 29, 2005, pp.1-14
8. AIFAN H., (1995): Climat, ressources en eau et développement agricole dans le moyen Bénin, mémoire de DEA, Dijon, France, 61 pages.
9. ALEXANDER, L. V., ZHANG, X., PETERSON, T. C., CAESAR, J., GLEASON, B., HAYLOCK, M., COLLINS, D., TREWIN, B., RAHIMZADEH, F., TAGIPOUR, A. ET AL.(2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111. no. D05109.
10. ALI A et LEBEL T (2009): The Sahelian standardized rainfall index revisited, *International Journal of Climatology* **29**(12), 1705–1714.
11. ALILA, Y. (1999): A hierarchical approach for the regionalization of precipitation annual maxima in Canada. *J. Geophys. Res.* 104(D24) 31645–31655.

12. AMANI, A. & LEBEL, T. (1998): Relationships between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. *Stochastic Hydrol. Hydraul.* 12, 141–154.
13. AMOUSSOU E., CAMBERLIN P., PERARD J., (2008); Instabilité spatio-temporelle des régimes pluviométriques dans le bassin versant du Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest) de 1961 à 2000, Centre de Recherche de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon
14. ANCEY C., (2005): Une introduction à la Dynamique des Avalanches et des Écoulements Torrentiels, *Cours*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, <http://www.toraval.fr/articlePDF/intro-risk.pdf>.
15. ANDRE, J. C. (2007) : Les cyclones tropicaux et le changement climatique. Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). 10 p.
16. AYMAN, F., (2006): Assessment of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change in North Africa : Food production and Water resources, AIACC project AF 90, Central Laboratory for Agricultural Climate (CLAC)/Agriculture Research Centre (ARC), Egypt, 148 p.
17. BAD., (2003) : Pauvreté et Changements climatiques: réduire la vulnérabilité des populations pauvres par l'adaptation, 43 p.
18. BADOLO M., (2007): Indications sur les incidences potentielles des changements climatiques sur la sécurité alimentaire au Sahel, Cahier des changements climatiques, IAVS, 9 p.
19. BAILLY A. S. (2004): Les concepts de la géographie humaine, Paris : Armand Colin (coll. U), 333p
20. BAILLY A. S., (1996) : Risques naturels, risques de sociétés, Paris : Economica, 103p.
21. BARROCA B., MOUCHEL J.-M., BONIERBALE T., HUBERT G., (2008): Chapter 13: Flood Vulnerability Assessment Tool (FVAT). *In* (Thévenot D.R. Ed.): Day Water: Adaptive Decision Support System for Integrated Urban Stormwater Control. *IWA Publishers*, London, 119-127.
22. BAUDOIN.M. A ;(2010): L'adaptation aux changements climatiques au sud du Bénin: Une analyse de la politique internationale et des besoins locaux ; *Geo-Eco-Trop.*, 2010, 34 : 155 – 169
23. BEAUDIN, I ;(2007): Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen.133p

24. BENYAHYA L, ANIK D, DANIEL C, DAN B, ANDRE ST-H.,(2009): Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada. Rapport de recherche. 67p
25. BERZ G., (2000): Flood disasters: lessons from the past - worries for the future, *Actes de colloque, Water and Maritime Engineering, Proceedings of the institution of Civil Engineers*, Vol. 142.
26. BESSON L (2009): Processus Physiques Responsables de l'Etablissement et de la Variabilité de la Mousson Africaine, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
27. BIGOT(2004) : Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales, l'exemple de la côte d'ivoire ; HDR 399 p
28. BLANCO, A.V., (2004): Comprehensive environmental projects: linking adaptation to climate change, sustainable land use, biodiversity conservation and water management, ENDS, Amsterdam, 70 p.
29. BOKO M., ADJOVI L.C., (1994) : Recherche des tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional : Implications agroclimatiques. In Publications de l'Association Internationale de Climatologie. Volume 7. Thessaloniki. Pp 294-304.
30. BOKO M, (1987) : Etude sur la variabilité pluviométrique au Bénin. In Climat et Climatologie. Volume d'Hommage offert au Professeur Pierre PAGNEY. Centre de Recherche de Climatologie, URA 909 du CNRS, Dijon., pp 41-50.
31. BOKO, M. (1988) : Climats et communautés du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et sciences Humaines. CRC, URA 909 du CNRS, Univ. de Bourgogne, Dijon. 2 volumes, 601 p.
32. BOKO, M. (1992) : Saisons et types de temps au Bénin, analyse objective et perceptions populaires. *L'espace Géographie*, n°4, pp.321-332.
33. BOKO, M. (2001) : Les changements climatiques et le développement économique, social et environnemental du Bénin : Planification et développement des zones côtières. Rapport de consultation, (MEHU/CC-TRAIN), Cotonou. 28 p..
34. BRICQUET J.P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., OLIVRY J.C. (1997) : Evolution recente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau*, (3), 321-337.
35. BROOKS, N, (2003): Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. Tyndall Centre for Climate Change Research, 20 pp.

36. BROOKS, N., (2006) :, Changement climatique, sécheresse et pastoralisme au Sahel (Note de discussion pour l'Initiative Mondiale sur le Pastoralisme Durable), novembre, 12 p.
37. BROU .T. (2005) : Climat, mutation socio-économique et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, université des sciences et techniques de Lille, France, 212p.
38. BROU T., SERVAT E., et PATUREI J.E., (1998) : Activités humaines et variabilité climatique: cas du sud forestier ivoirien, IAHS, 252,365-373.
39. BROU Y.T.,(1997) : Analyse et de la pluviométrie dans le sud forestier ivoirien : recherche de corrélation entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Université de Cocody, Abidjan, 211 pages.
40. BROWN, O., CRAWFORD, A. (2009) : Changement climatique et sécurité en Afrique: Une étude réalisée pour le Forum des ministres des Affaires étrangères d'Afrique du_ord. Winnipeg, Institut international du développement durable, p. 1-30.
41. BURTON, I., (2001): Vulnerability and Adaptation to Climate Change in drylands, 13 p.
42. CASDAR (2001) : Aménagements agroforestiers et Biodiversité fonctionnelle. Region midi Pyrénées, 9p.
43. CASENAVE A., and VALENTIN C., (1988) : Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom Paris, Coll. Didactiques, p. 202.
44. CASTANY G., (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Paris, Dunod, 236 pages.
45. CAZENAIVE, A. (2008) : L'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact possible sur la géographie de la France à l'horizon 2005, 2050 et 2100 (Tome 1 : Rapport). 120 p.
46. CEA, (2006) : Note conceptuelle, Conférence internationale sur les implications du changement climatique global sur la vulnérabilité des systèmes naturelles, économiques et sociaux en Afrique de l'Ouest, Commission économique pour l'Afrique, Bureau pour l'Afrique de l'Ouest, août 2006
47. CEDEAO, CSAO, OCDE, (2008) : Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest, Série Environnement : le Climat et les Changements Climatiques, 1-24 pp.

48. CHAPIN III F.S., E.S. ZAVALA, V.T. EVINER, R.L. NAYLOR, P.M. VITOUSEK, H.L. REYNOLDS, D.U. HOOPER, S. LAVOREL, A.O.E. SALA, S.E. HOBBIE, M.C. MACK ET S. DIAZ, (2000) : Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405 :234-242.
49. CHARNEY J, QUIRK W, CHOW S AND KORNFIELD J (1977) A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions., *Journal of Atmospheric Sciences* **34**, 1366–1385.
50. CHARNEY J.G. (1975): Dynamics of desert and drought in the Sahel. *Quat. J. Royal Met. Soc.*101, 193- 202.
51. COLIN, L. S. (2004) : Changement climatique, phénomènes météorologiques extrêmes et effets sur la santé en Alberta. Université d'Alberta.3p.
52. Courel, M.F., R.S. Randel and S.I. Rasool, (1984); Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, 307, 528-531.
53. CREUTIN, J.-D. & OBLED, C. (1982): Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resour. Res.* 18(2), 413–431.
54. CURÉ P., (1945) : Remarque sur l'équivalence de certains indices utilisés pour la classification des climats. *La Météorologie*, pp. 202-208.
55. DAOUDA HAMANI, O. (2007) : Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques : cas du département de Téra au Niger. Mémoire de Master en développement. Université Senghor, Département de l'environnement. Alexandrie, Egypte, 94p.
56. De SOUZA J. P., (1987) : Les incidences des inondations sur la santé des populations des districts urbains de Cotonou riverains du Lac Nokoué. Mémoire de maîtrise de géographie, 131 pages. + annexe.
57. DELHOMME, J. P. (1978) : Application de la théorie des variables régionalisées dans le domaine des sciences de l'eau. *Bull. du BRGM (2ème série) Session III*, 4, 341–375.
58. Deuxième rapport d'évaluation du GIEC sur les Changements climatiques, « Climate Change 1995 ».
59. DIEUDONNE, G., (2001) : « Afrique : le continent le plus vulnérable », *Bulletin Africain (Point de vue)*, n°14 hors-série, RABEDE, Enda Tiers-Monde, Octobre, Dakar (Sénégal).
60. DIOP (2010) : Rapport spécial IPCC sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique, 16 p

61. DIRECTION GENERALE DE L'EAU (2008) : Atlas hydrographique de Bénin ; 22p
62. DJENONTIN I. N., (2010) : Vulnérabilité des ressources en eau face aux changements climatiques et stratégies endogènes de gestion développées dans le secteur agricole : cas des Communes de Banikoara et de Malanville (Alibori-bénin) : thèse d'ingénieur agronome, FSA, UAC, 109p.
63. DOLMAN A, GASH J, GOUTORBE J, KERR Y, LEBEL T, PRINCE S AND STRICKER J (1997): The role of the land surface in Sahelian climate : HAPEX-Sahel results and future research needs, *Journal of Hydrology* 188, 1067–1079.
64. 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. 104p.
65. DORSOUMA Al Hamndou et Mélanie Requier-Desjardins, (2008) « Variabilité climatique, désertification et biodiversité en afrique : s'adapter, une approche intégrée », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 8 Numéro 1 | avril 2008, mis en ligne le 07 novembre 2008, Consulté le 04 décembre 2011. URL : <http://vertigo.revues.org/5356> ; DOI : 10.4000/vertigo.5356
66. DOUVILLE. H. (2008) : Influence des surfaces continentales sur la variabilité du cycle hydrologique des échelles inter--annuelle à multi-décennale. HDR ; Centre National de Recherches Météorologiques de Toulouse ; 132 p
67. DOUVINET J., DELAHAYE D., (2010): Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, 73-90.
68. DOWNING, T. (2003): «Lin king sustainable livelihoods and global climate change 111 vulnerable food systems». *Die Erde*, vol. 133, p. 363-378.
69. DOWNING, T., PATWARDHAN A., KLEIN R., MUKHALA E., STEPHEN L., WINOGRAD M. ET ZIERVOGEL. G. (2005): «Vulnerability assessment for climate adaptatioJ1». In *Adaptation Policy Framework for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, Lim et Spanger-Siegfried, Cambridge, University Press, 24 p.
70. DRIOUECH F, (2010) : Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes, Thèse de Doctorat de géographie, Institut National Polytechnique de Toulouse, 164p
71. DSRP. (2002): Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté au Bénin 2003 -2005.

72. DUBREUIL P. (1974) : *Initiation à l'analyse hydrologique*, Masson et Cie et ORSTOM Ed. Paris, 216 p
73. DUMOLARD P., CHARLEUX L., 2005 : *Les statistiques en Géographie*. Belin, 240p
74. EASTERLING, D., G. MEEHL, C. PARMESAN, S. CHANGNON, T. KARL, AND L. MEARNES, (2000): *Climate extremes, observations, modeling and impacts*. *Science*, 289, 2068- 2074.
75. ENDA et CIAT., (2005) : *Renforcement des capacités en matière d'évaluation de la vulnérabilité et des stratégies d'adaptation aux changements climatiques*. Modules I, II, III du Manuel Winograd (Colombie). ENGEES-ULP: 101.
76. FALL, B., J.P. CORREA, S. SARR (2011): *Guide Méthodologique pour L'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique au civeau communautaire (Zones Cotières)*, consultant report by Environnement-Développement du Tiers Monde (ENDA), Dakar, Senegal, for USAID/COMFISH project, 48 pp
77. FAO, (2011) : *Stratégie de gestion des risques de catastrophe en Afrique de l'Ouest et au Sahel* 53 P
78. FAO,(2007): *Climate change and Food Security: a Framework for Action*, Rome, 2007. (Document publié pour la conférence de Bali).
79. FARES B., (2012): *Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi-aride « cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 »*. Diplôme de Magister en Hydraulique 181p
80. FEM, (2006): *Managing Climate Risk, Integrating Adaptation into World Bank Group Operation*, Banque Mondiale, Fonds pour l'Environnement Mondial, 2006-09-20
81. FIDA., (2008) : *Le changement climatique : un enjeu pour le développement. et la désertification*.
82. FOLEY, J.C. (1957): *Droughts in Australia: Review of Records from Earliest Years of Settlement to 1955*, Australian Bureau of Meteorology, Bull. 43, 281pp.
83. FOLLAND, C.K., T.N. PALMER AND D.E. PARKER, (1986) *Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985*. *Nature*, 320, 602-607.
84. FORUM POUR LE PARTENARIAT AVEC L'AFRIQUE UNITE DE SOUTIEN (2007) : *L'Afrique et le changement climatique*. 4p
85. FOUCHIER C. (2010);"Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues". Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, Cemagref, 266 p

86. FRITSCH H., J.M., MASSON, J.M., MARIEU, B. (1998) : Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : Water Resources Variability in Africa during the Xxth century. Proceeding of Abidjan'98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998 (ed. by Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. et Hulme M.), 323-337. IAHS Publ. 252.
87. GACHON P., N. GAUTHIER, A. BOKOYE, D. PAUISHKURA, A. COTNOIR, Y. TREMBLEY ET G. VIGEANT. (2007) : Variabilité, extrême et changement climatique au Sahel: de l'observation à la modélisation. Rapport de projet - Entente de coopération entre le Centre AGRHYMET et Environnement Canada. Version mars 2007. p. 10-64.
88. GAILLARD J.-C., LIAMZON C.C., VILLANUEVA J.D., (2007): Natural disaster ? A retrospect into the causes of the late 2004-typhoon disaster in Eastern Luzon, Philippines. *Environnemental hazards* 7-3, 257-270. tel-00787142
89. GIANNINI A., SARAVAN R., CHANG P. (2003) :Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal timescales. *Science*, 302, 1027-1030.
90. Gibbs, W.J. (1975): Drought-its definition, delineation and effects, In: Special Environmental. Report, 5, 11-39, World Meteo., Geneva, Switzerland.
91. GIEC (2002) : Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat: 97.
92. GIEC (2012) : Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique : résumé à l'intention des décideurs, Rapport des Groupes de travail I et II. 32 p
93. GIEC, (1995) : Seconde évaluation du GIEC: changement de climat (Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 64 p.
94. GIEC, (2007) : Changements climatiques 2007 (Rapport de synthèse), 103 p.
95. GIL M, PATUREL, E, BARBIER, B, KARAMBIRI h, DEZETTEr A, DIEULIN C, ROUCHE N, (2010) : Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. Sècheresse en ligne 6p
96. GILARD (1998) : Les bases techniques de la méthode Inondabilité. Cemagref éditions, 1998, 207p.
97. Gilard O. et Gendreau N., (1998) : Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants, *Revue Sciences de l'Eau*, Vol. 11 (3), pp. 429-444.

98. GOULA BI T.A., SAVANE I., BROU K., VAMORIBA F. et GNAMIEN B.K., (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Revue en science de l'environnement Vertigo* vol 7
99. GRAWITZ, M., (1994) : *Lexiques des sciences sociales*, Paris, Dalloz, 576 p.
100. GROISMAN, P. Y, KNIGHT, R. W, EASTERLING, D. R, KARL, T. R, HEGERL, G. C & RAZUVAEV, V. N (2005) : Trends in intense precipitation in the climatenrecord". *Journal of Climate*. Vol. 18. no. 9, 1326- 1350. GTZ. _ Note introductive n° 1. OSS : Tunis, 2007. _ 2e édition. 28 pp. ISBN : 978-9973-856-24-11
101. HABİYAREMYE. F. X ; ROCHE M. E (2004) : Contribution à l'observation de variations environnementales au Mali par l'analyse d'un transect phytogéographique Bamako- Tombouctou. *Geo-Eco-Trop*, 2004, 28, 1-2: 1-14 ; 26 p
102. HANSEN J, SATO M, KHARECHA P, BEERLING D, BERNER R, MASSON-DELMOTTE V, PAGANI M, RAYMO M, ROYER D AND ZACHOS J (2008): Target atmospheric CO2 : Where should humanity aim ?, *Atmospheric Sciences Journal* 2, 217–231.
103. Hayes, M.J., Svoboda, M. D., Wilhite, D.A. and Vanyarkho, O.V. (1999): Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 80, 3, 429–438.
104. HENDERSON-SELLERS A., R.E. Dickinson, et M.F. Wilson, (1988 :) Tropical deforestation: important processes for climate models. *Climatic change* 13: 43-67
105. HEWITSON, B.C., (2006): The development of Regional Climate Change scenarios for Sub-Saharan Africa, AIACC Project N° AF 07, University of Cape Town/START, 92 p.
106. HOSKING, J. R. M., Wallis, J. R. & Wood, E. F. (1985): An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK flood studies report. *Hydrol. Sci. J.* 30(1), 85–109.
107. HOSTACHE R. (2006) : Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. These de Doctorat ; Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts ; Cemagref ; 256
108. HOUGHTON, R.A. et J.L. Hacker, (2005): Carbon flux to the Atmosphere from Land-use changes: 1850-2005, The Woods Hole Research Center, USA, 74 p.
109. HOUNDENOU C., (1992) : Variabilité pluviométrique et conséquences socio-économiques dans les plateaux du bas-Bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire de

DEA "Climats et contraintes climatiques". URA 909 du CNRS "Climatologie Tropicale". Université de Bourgogne. 2 volumes, Dijon, 90 pages.

110. HOUNDENOU C., (1999) : Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, diagnostic et modélisation. Th. de doct. De l'Univ. de Bourgogne. UMR 50 80 du CNRS, climatologie de l'espace tropicale, 341 p.
111. HOUNKANNOUNON J., (1979) : les précipitations en République Populaire du Bénin (d'après la normale 1961-1970). Mémoire de Maîtrise de géographie. Université Nationale du Bénin, Cotonou, 51 pages + annexes.
112. HOUNKPONOU, k. S., BOKONON-GANTA, E., NOUATIN G., GNANGASSI, C. et M. AHOUNOU, (2008) : Changements climatiques au Bénin : Vulnérabilité et stratégies d'adaptation. PARBCC. 3p.
113. HOUNTONDJI, P. J. (1994) : Les savoirs endogènes : Pistes pour une recherche. Série de livres du CODESRIA. Dakar, Pp : 1-34
114. HOURCADE J-C., (1994) : Analyse économique et gestion des risques climatiques, *Natures, Sciences et Sociétés*, 2(3), pp. 202-211
115. HOURCADE J-C., (1997) : Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre, In : [Godard O., Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines], pp. 259-294
116. HUBERT P, CARBONNEL J AND CHAUCHE A (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques—application a des séries de précipitations et de débits de l'afrique de l'ouest, *Journal of hydrology* **110**(3-4), 349–367.
117. HULME, M. et M. Kelly, (1993) : Exploring the links between desertification and climate change. *Environment* 35: 4, 39-11, 45
118. IBRAHIM B. (2012) : Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Laboratoire de Météorologie Dynamique de Paris (UPMC). Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (2IE). These de Doctorat 245 p
119. IFDC (Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement Agricole). (2006) : Expériences d'apprentissage de la lutte étagée ciblée avec les Producteurs à la base dans les conditions de Banikoara : Rapport technique d'activités de la campagne 2006 - 2007.
120. IGLESIAS A., Ward M. et C. Rosenzweig, (2003): Water availability for agriculture under climate change: understanding adaptation strategies in the Mediterranean
121. IMPETUS (2009) : Atlas du Bénin. Résultats de Recherche 2000 – 2007.

122. INRA/SAD. (1988) : Mots, concepts et contenu : définition de quelques termes spécifiques au champ du Département de recherche sur les systèmes agraires et le développement. Versailles, INRA-SAD.
123. INSAE (2004) : Cahiers des villages et quartiers de villes du Département de Borgou et Alibori
124. INSAE-RGPH III, 2002. Troisième Recensement General de la Population et de l'Habitation (2002). Cotonou, Benin.
125. IPCC, (2001): Climate change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, Cambridge Press, UK, 1032 p.
126. IPCC, (2002): Climate change and Biodiversity (IPCC Technical Paper V), 77 p.
127. IPCC, (2007) : Bilan 2007 des changements climatiques: l'atténuation du changement climatique, Contribution du Groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation (Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique), 119 p.
128. IPCC, (2007): Africa : Climate change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II (Chapter 9), Cambridge University Press, UK, pp. 433-469.
129. ISSA M. S. (2012) ; Changements Climatiques et agrosystèmes dans le Moyen Bénin : impacts et stratégies d'adaptation. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 273 p.
130. JANICOT S., FONTAINE B., (1993) : L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. La Météorologie, 8, pp. 28-53.
131. JANICOT S., FONTAINE B., et MORON V., (1995) : Connexions entre circulation atmosphérique et précipitations sur l'Afrique de l'Ouest de 1958 à 1989. First Conference of the African Meteorological Society, Nairobi, Kenya, 335-347.
132. JANICOT S., MORON V., FONTAINE B., (1996): Sahel drought and ENSO dynamics. Geophysical Research Letter, 23, 515-518.
133. JANICOT S., MOUNIER F., HALL N.M.J., LEROUX S., SULTAN B., KILADIS G.N., (2009) Dynamics of the West African Monsoon. Part IV: Analysis of 25-90
134. JANICOT S., SULTAN B., 2001: Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. Geophysical Research Letter, 28, 3, 523-526.

135. JANICOT S., TRZASKA S., and POCCARD I.,(2001): Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dynamic*, 18, 303-320.
136. JAUFFRET, S., (2000) : Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides, application au suivi de la désertification dans le sud tunisien, Thèse d'écologie, Université d'Aix-Marseille, 328 p. + ann.
137. JEAN, B. (1985) :Sécheresse et désertification au Mali : situation actuelle et perspectives. *Revue Forestière Française*, 2 : 77-92 et 4 : 315-331
138. JONES, R.N. & Preston, B.L (2010): Adaptation and Risk Management. Climate Change Working Paper No. 15.
139. JOUBERT A.M., et B. Hewitson, (1997): Simulating present and future climates of southern Africa using general circulation models, *Progress in physical geography* 21: 51-78
140. KAMAGATE B ; DAO A; MARIKO A; GOULA B ; SEGUIS L ; MAIGA H; SAVANE I., (2010) : Variabilité Climatique et Réponse Hydrologique du Bassin Versant Transfrontalier de Kolondièba au Sud du Mali. *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.43 No.4 (2010), pp.435-444 EuroJournals Publishing, Inc. 2010 <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>; 10 p
141. KATZ R et BROWN B (1992): Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages, *Climatic change* 21 (3), 289–302.
142. KHALDI, A (2005) : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". These de Doctorat Université d'Oran ;239 p
143. KLEIN R.J.T., (2002): Climate change, Adaptive capacity and Sustainable development, Potsdam Institute for Climate Impact research, Germany, OECD Headquarters, 13-14 March, 10 p..
144. Kouamé F., Gion, P., Biémi J. & Kouadio, A. (1999); Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires: exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Télé-détection* 1, 139–156.
145. KRAMER PJ (1980): Drought, Stress and the Origin of Adaptations. In *Adaptation of plants to water and high temperature stress* (eds Turner NC, Kramer PJ). John Wiley & Sons, New-York.
146. KREIS N. (2004) : Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation. [PDF téléchargeable]. Thèse de doctorat, spécialité Sciences de l'Eau, Strasbourg, 2004, 350p.] http://bib.rilk.com/1251/01/KREIS_nicolas.pdf

147. KREIS, N. (2001) :Utilisation de l'information géographique pour cartographier le risque d'inondation. Application à la vallée de la Thur (68). CEVH. Strasbourg, Mémoire de DEA –
148. KREIS, N. (2003): Re-entering river waters onto floodplains requires hydrological and hydraulics modelling. ECOFLOOD Conference, Warsaw.
149. LAMARRE D. (1999) : Les risques liés au climat. Dijon : Editions Universitaires de Dijon, 222 p.
150. LAMBERT R., PRUNET C., (2000) : L'approche géographique de l'inondation. L'exemple de la Garonne à l'aval de Toulouse. In : Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édité. SEDES, Paris, p. 39-53.
151. LANDSBERG H (1975): Sahel drought : Change of climate or part of climate ?, *Theoretical and Applied Climatology* **23**(3), 193–200.
152. LAVAL K (1986): General circulation models experiments with surface albedo changes. Climatic change, volum, *Climatic change* **9**(1-2), 91–102.
153. Le BARBE L., ALE G., MILLET B., TEXIER H., BOREL Y., (1993) : Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, 540 pages.
154. LEBEL, T., AMANI, A. & TAUPIN, J. D. (1996) :La pluie au Sahel: Une variable rebelle a la régionalisation. In: Actes de l'Atelier: Problèmes de validation des méthodes d'estimation des précipitations par satellite en Afrique intertropicale (Niamey, 1-3 décembre 1994) (00. by B. Guillot), 103-119. Collection Colloques et Séminaires, ORSTOM.
155. LEBEL, T., AMANI, A., (1999): Rainfall estimation in the Sahel. What is the ground truth? *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 555–568.
156. Léone F., (2003) : Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par des mouvements de terrain. Collection Thèse à la carte, Presses Universitaires du Septentrion, villeneuve d'ascq, 245 p.
157. LERIDON, H. (2007) : Événements climatiques extrêmes et société, Leçons du passé lointain. Académie canadienne. 12p
158. LEVITT J (1972): *Responses of Plants to Environmental Stresses*. Academic Press, New-York.
159. LEZINE, A.M. (1989a): Late Quaternary Vegetation and Climate of the Sahel. *Quaternary Research*, 32: 317-334.

160. LIENOU G. (2007) : Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun. Thèse de Doctorat de l'université Yaoundé I ; 486 P
161. LIMOUSIN (2009) : Vulnérabilité du chêne vert (*quercus ilex l.*) a une augmentation de la sécheresse : quels ajustements fonctionnels ? Thèse de Doctorat de Biologie de l'Evolution et Ecologie ; Montpellier supagro, 250p
162. LOUVET S., FONTAINE B. ET ROUCOU P., (2003): Active phases and pauses during the installation of the West African monsoon through 5-day CMAP rainfall data (1979-2001). *Geophysical Research Letters*, 30, p. 2271-2275.
163. LUBES H., MASSON J-M., SERVAL E., PARTUREL J-E., KOUAME B., (1994) Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par l'application de tests statistiques, étude bibliographique. Programme ICCARE, ORSTOM, rapport n°3, 21 pages.
164. LUBES-NIEL, H., MASSON J. M., PATUREL, J. E. & SERVAT, E. (1998) : Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 3, 383–408.
165. Mabbutt, J.A. (1986). Oeseltification indicators. In *Climatic Change*, vol. 9, p. 113-122.
166. MADIODIO N., AFOUDA A., et AMANI A, (2004) : Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: élément de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. UICN, Glan, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. XVIII + 71p.
167. MAHÉ G., OLIVRY J.C., (1991) : Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. In *Hydrology for the water management of large river basins*, F.H.M. Van de Ven, D. Gutknecht, D.P. Loucks & K.A. Salewicz, Eds, Congrès AISH, Vienne, Autriche, 13-15 août 1991, Publication AISH, 201, 163-172.
168. MAHE, G. & OLIVRY, J.C. (1995) : Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6 (1), 109–117.
169. MAHÉ, G., OLIVRY J.C. (1999): Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical coast of Africa (1951-1989). *C. R. Acad Sci. Paris* 328, 621-626.
170. MAHE, G., OLIVRY J.C., DESSOUASSI, R., ORANGE, D., BAMBA, F., SERVAT, E. (2000) : Relations eaux de surface eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad Sci. Paris*

171. MAHE, G., OLIVRY, J.-C. (1995): Variations des précipitations et des écoulements en Afrique : Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. Proceeding Rabat symposium April 1997 (ed. by Rosbjerg D., Boutayeb N., Gustard A., Kundzewicz
172. MALEY, J. (1996) : Les fluctuations majeures de la forêt dense humide africaine au cours des vingt derniers millénaires. In *L'alimentation en forêt tropicale : interactions bioculturelles et applications au développement*. M. Hladik et al. ed, 55-76. UNESCO, Parthenon Publ., Paris
173. MALEY, J. (1983) : Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique du Nord-tropicale au quaternaire récent. *Bothalia*, 14, 384 : 377-389
174. Manuel du PNUE sur les méthodes d'évaluation des incidences de l'évolution du climat et des stratégies d'adaptation.
175. MARA F, (2010) Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéniennes face à la variabilité du climat: le cas de la ressource en eau dans la vallée de la sirba au Burkina Faso. Doctorat en sciences de l'environnement. Université du Québec à Montréal. 273p
176. MASSON, J.M. (1997) : Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'ouest et centrale non sahénienne et conséquences sur les ressources en eau. In : FRIEND'97
177. MASSUEL S. (2005) : Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. These de Doctorat de l'Université Montpellier II ; 238 P
178. MATTHEWS H AND CALDEIRA K (2008): Stabilizing climate requires near-zero emissions, *Geophysical research letters* 35 (4), L04705.
179. McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (eds.), Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 179–84. 17–22 January 1993, Anaheim, Calif., Boston, Mass., American Meteorological Society.
180. MEHU (2000) : Synthèse des études de vulnérabilité et d'adaptation. Secteur « Ressources en eau dans le département des Collines » au centre du pays et « Santé et établissements humains dans le littoral ». Programme CC : TRAIN, MEHU, Cotonou. 24p + annexes
181. MENAD W., DOUVINET J., BELTRANDO G., ARNAUD-FASSETTA G., (2012) : Evaluer l'influence de l'urbanisation face à un aléa météorologique

- remarquable : les inondations des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie). Vol. 03. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, sous presse, 81-94
182. MEPN (2006) : Evaluation concertée de la vulnérabilité aux variations actuelles du climat et aux phénomènes météorologiques extrêmes. *Rapport de synthèse*.
 183. MEPN (2008) : Programme d'Action national d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (PANA BENIN).
 184. MEYLAN ET MUSY, (1999) ; Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. *Annale revue hydrologie*. 19 P.
 185. MILLER, I., FREUND, J., AND RICHARD, J.: (1992); Probability and Statistics for engineers. Ed. Prentice Hall Inc., USA, 1992.
 186. MIQUEL, J: (1984) : Guide pratique d'estimation des crues. Ed. Eyrolles, France.
 187. MOHAMMED L. (2008) : Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. CRTS ; 38p *Montpellier II*, France.
 188. MOUAT, D., J. LANCASTER, T. WADE, J. WICKHAM, C. FOX, W. KEPNER ET T. BAIL. (1997). «Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model». *Environment Monitoring and Assessment*. vol. 48 p. 139-156.
 189. MUSY,A. et LAGLAINE, V. (1992) : Hydrologie générale, Ed. *Presse Universitaire du EPFL Lausaune*, Suisse.
 190. NASI, R. (1994) : La végétation du centre régional d'endémisme soudanien au Mali. Etude de la forêt des Monts Mandingues et essai de synthèse. Thèse de doct. en Sciences. Univ. Paris XI, 176 p. + annexes
 191. NDJENDOLE S., (2001) : Contraintes pluviométriques sur les cultures annuelles en Centrafrique : l'exemple de la culture cotonnière. Thèse de doctorat en Climatologie, CRC Dijon, Université de Bourgogne, 227 pages.
 192. N'GUESSAN BI V., (2011) : Etude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau : application à l'analyse du risque d'inondation dans le département de Sinfra. (centre-ouest de la côte d'ivoire).Rapport final du projet individuel, 2iE, 42p
 193. NIASSE M, AFOUDA A et AMANI A (2004) : Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, Iucn, Gland, Cambridge, Royaume-Uni.

194. NIASSE ; M. (2007) : éléments de stratégie régionale d'adaptation au changement climatique basée sur l'approche de partage des risques -Afrique de l'ouest, 62 P
195. NICHOLSON S (2000): Land surface processes and Sahel climate, *Rev. Geophys* 38(1), 117- 139.
196. NICHOLSON S et PALAO I (1993) : Are-evaluation of rainfall variability in the sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations, *International Journal of Climatology* 13(4), 371– 389.
197. NICHOLSON S., (1983): Sub-Sahara rainfall in the years 1976-1980: evidence of continued drought. *Monthly weather rev*; 3: 1964-54.
198. NOUFE D ;(2011) : Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire ; Thèse de Doctorat de géographie ; Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne U.F.R. de géographie UMR 8586 PRODIG ; 375p
199. OBERLIN G., GAUTIER J.-N., CHASTAN B., FARISSIER P. & GIVONE P., (1993) : Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables : le programme « Inondabilité » du CEMAGREF, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 4 (3), pp. 171-176.
200. OCDE, (1997) : Stratégie de l'Environnement de l'OCDE pour les dix premières années du XXIème siècle, 65 pages.
201. OCDE, (2005) : Contre vents et marées, les politiques de développement face aux changements climatiques, OCDE éditions, 2005
202. OGOUWALE, E. (2004) : Changements climatiques et sécurité alimentaire dans le Bénin méridional. Mémoire de DEA, UAC/EDP/FLASH, 119p.
203. OGOUWALE, E. (2006) : Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH/ EDP/ UAC, 302p
204. OKRY, C. (2000) : L'igname dans le système agricole de Bantè et la domestication de quelques unes de ses formes sauvages. Savoirs locaux et pratiques endogènes de cultures et d'amélioration génétiques. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur agronome. FSA-UAC. 87p
205. OLIVRY J, BRIQUET J MAHE G (1994).De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies, *Revue de Géographie Alpine* 12, 101–8.

206. OLIVRY J.C., BRICQUET P. J., MAHE G. (1993): les études du PEGI sur le bassin du Congo-Zaïre dans le contexte déficitaire des ressources en eau de l'Afrique humide. Actes du colloque PEGI, INSU - CNRS, pages 3-12. Paris.
207. OLIVRY JC., BRICQUET JP. MAHE G. (1998) : Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des 2 dernières décennies". IAHS publication, n°252, pp.
208. OLIVRY, F., (2012) : Exploration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes essentiels d'une région face aux extrêmes météorologiques dans un contexte de changements climatiques ; 144p
209. OMM, (1999) : Guide des pratiques hydrologiques, Organisation météorologique mondiale, Publication n° 168, Genève, 793 pages.
210. OSS, (2000) : Éléments de réflexion sur une stratégie sous-régionale (les pays de l'UMA) relative à la gestion de la sécheresse (avant-projet), 20 p.
211. OSS, (2006): West Africa's vulnerability to climate impacts on water resources, and desertification, 19 p.
212. OSS, (2007) : Adaptation aux changements climatiques et Lutte contre la Désertification (Note introductive), 34 p.
213. OSS,(2007) : Vulnérabilité et Adaptation aux changements climatiques dans la zone circum-saharienne : Importance de l'information environnementale et de la coopération régionale, 52 p.
214. OUEDRAOGO M (2002) : Contribution a l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale, PhD thesis, Université Montpellier II, Montpellier, France.
215. OUEDRAOGO, M. (2001) : Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. *Thèse de l'Université de*
216. PAETH H AND HENSE A (2004): SST versus climate change signals in West African rainfall: 20th-century variations and future projections, *Climatic Change* 65 (1), 179–208.
217. PAGNEY P., (1973) : La climatologie. *Que sais-je*, n°171, PUF, 127 pages.
218. PANA, (2008) : Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (Pana-Benin) Cotonou, janvier

219. PATUREL JE., SERVAT E., KOUAME B. et BOYER JF., (1995) : Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Bulletin. Sécheresse.*, vol. 6, n°1, pp. 95-102.
220. PATUREL, J.E., KOUKPONOU, P., OUATTARA, F. LAOUR, A. MAHE, G. & CRES, F. N. (2002) : Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXème siècle. *Sud Sciences et Technologies* 8, 41–49.
221. PELTIER A. (1995) : La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale étude comparative du valais (suisse), de la vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France). Thèse de Doctorat, Tome 1, Université Toulouse II-le Mirail, 741 p
222. PELTIER A. (2005); la gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale : Etude comparative du Valais (Suisse), de la Vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France), thèse de doctorat Unique, tome I, Toulouse II, 741p
223. PERARD J. (1992): Eaux et société en pays Fon. Actes du colloque – l'eau, mythes et réalités, Dijon, 18-21 novembre 1992, Centre Gaston Bachelard. Dijon, pp 53-68.
224. PERRET.C. (2008) : les défis du changement climatique et des bioénergies. 8p
225. PERRETTI-WATEL ;(2001) : La société du risque, Paris : La Découverte, 55 p.
226. PETTITT, A.N. (1979); A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem". *Journal of the Royal Statistical Society*. Vol. 28. N°. 2, p. 126{135.
227. PHILIPPE ROUDIER, GIL MAHE (2011) : Calcul des pluies et débits classés sur le bassin du Bani (Mali) : une approche de la vulnérabilité des ouvrages et de la population depuis la sécheresse ; *Hydrological Sciences Journal* 351-363 ; 32
228. 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 pages.
229. POFAGI K. M. et TONOUEWA A. (2001) : Renversement de la tendance à la dégradation des terres et des eaux dans le bassin béninois du fleuve Niger. *PNUD*.
230. POMERLEAU, J ;(2009) : Changements climatiques et sécurité en Afrique ; centre universitaire de formation en environnement université de Sherbrooke ; 99p

231. RAMEL R (2005) : Impact des processus de surface sur le climat en Afrique de l'Ouest, PhD thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble, France.
232. REQUIER-DESJARDINS, M., (2007) : Pourquoi faut-il investir en zones arides ?, Les Dossiers thématiques du CSFD, N°5, Comité Scientifique Français de la Désertification, Agropolis International, 32 p.
233. ROUDIER.P., (2008) : Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique : approche par indicateurs. Mémoire de stage de Master 2 Risques Naturels .73p
234. ROUSSEAU, S. (2006) : Capabilités, risques et vulnérabilité, C3ED, Université de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines, 10 p.
235. RUFAT S., (2009): Estimation relative de la vulnérabilité urbaine à Bucarest. *Mappemonde*, n°95.
236. RUIN I., GAILLARD J.-C., LUTOFF C., (2007): How to get there? Assessing motorist' flash flood risk perception on daily itineraries. *Environmental hazards* 7, 235-244.
237. SALEY M.B., (2003) : Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)". Thèse unique de doctorat, université de Cocody.
238. SALEY M.B., KOUAMÉ F. K., PENVEN M. J. :BIÉMI J. et BOYOSSORO.H., (2005) :Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : apport des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Téledétection* 4, 277-288.
239. SALEY, M. B., B. KOUAME, K. F., PENVEN, M. J., BIEMI, J. & KOUADIO, B. H. (2005) : Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest non sahélienne. C. R. Acad. Sci., Paris 325, Série IIa, 779-782.
240. SAMBA-KIMBATA M.J., (1991) : Précipitations et bilan de l'eau dans le bassin forestier du Congo et ses marges. Thèse d'état, Université de Bourgogne, 241 p.+fig.
241. SAVANE I., COULIBALY K.M. et GION P., (2001) : Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 12, 4, 231-237.
242. SEN, A.K., (1992), : Inequality Reexamined, trad. fr. Repenser l'inégalité ,Seuil, Paris.

243. SERVAT E, PATUREL J, KOUAME B, TRAVAGLIO M, OUEDRAOGO M, BOYER J, LUBES-NIEL H, FRITSCH J, MASSON J; MARIEU B (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale, *IAHS PUBLICATION* pp. 323–338.
244. SERVAT E., PATUREL J-E., LUBES H., KOUAME B., OUEDRAOGO M., MASSON JM., (1997) : Variabilité climatique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée. Première partie : analyse détaillée du phénomène en Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191, 1-15.
245. SERVAT, E., PATUREL, J. E., LUBES, H., KOUAME, B., OUEDRAOGO. M. & MASSON. M.; (1997): Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea- Pan 1: detailed analysis of the phenomenon in Cote d'Ivoire. 1. *Hydrol.* 191, 1-15.
246. SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASSON, J.M., TRAVAGLIO, M. & MARIEU, B. (1999): Différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, **12** (2), 363–387.
247. SIGHOMNOU D., (2004) : Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de doctorat d'Etat es sciences naturelles, Yaoundé, Université de Yaoundé I, 291 pages
248. SIX M., 1998 : Croyances traditionnelles et gestion de l'espace dans la sous-préfecture d'Allada (Bénin). Mémoire de maîtrise. Université de Paris IV Sorbonne, France, 139 p.
249. SOGREAH I., (1997) : Etude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau au Bénin. – Assistance à la définition de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin. - Diagnostic de la gestion des ressources en eau. Cotonou, 194 pages.
250. SOLOMON S, PLATTNER G, KNUTTI R AND FRIEDLINGSTEIN P (2009): Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (6), 1704.
251. SUTCLIFFE V.J., PIPER B.S., (1986) : Bilan hydrologique en Guinée et au Togo - Bénin. In *hydrol. Continent.*, vol I, n° 1, 51 - 61.
252. SWIFT, J., (1996): Desertification: narratives, winners and losers. In the lie of the land challenging received wisdom on the African environment, ed. M Leach and R. Mearns, 73-90
253. TEXIER P., (2009.): Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta, Indonésie. Réponses sociales, institutionnelles et

non institutionnelles, Thèse de géographie, université Paris- Diderot (Paris 7), 416 p. + annexes.

254. THOURET J.-C., D'ERCOLE R., (1996): Vulnérabilité aux risques naturels en milieux urbains: effets, facteurs et réponses sociales. *Cahier des sciences humaines*, 32-2, 407-422.
255. TORTEROTOT J. P., (1993) : le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes, *Thèse de doctorat*, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 284 p. + annexes.
256. TOTIN V. S. H., (2003) : Changements climatiques et vulnérabilité des ressources en eau sur le plateau d'Allada : Approche prospective. Mémoire de maîtrise de géographie, 106 p.
257. UICN-BRAO, GWP-WAWP, CILSS, (2003) : Eau, changement climatique et désertification en Afrique de l'ouest : stratégie régionale de préparation et d'adaptation ;59 p
258. UNCBD et UNEP, (2007) : La diversité biologique et les changements climatiques, 44 p.
259. UNCBD, (1992) : La Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique, 33 p.
260. UNCCD, (1994) : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique (texte final de la convention), AG/ONU, 65 p.
261. UNEP, (1998): Linkages in national implementation of selected multilateral environmental agreements (Note by the Secretariat), AMCEN Special consultation, Nairobi, 19-23 October 1998
262. UNESCO (2009) : Proposition d'un nouveau thème dans le contexte du Programme MAB : Les agroécosystèmes. SC-09/CONF.207/INF.7 Paris. 7 p.
263. UNESCO, (2004) : Les changements climatiques, Edition Unesco, COI Forum Océans, ISBN 92-3-203938-9
264. UNFCCC (2004): Application of methods and tools for assessing impacts and vulnerability, and developing adaptation responses (Background paper), 21st session of Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, Buenos Aires, 6-14 December 2004, 24 p.

265. UNFCCC (2006): Background paper for the African Workshop on Adaptation Implementation of Decision 1/CP.10 of the UNFCCC Convention, Accra (Ghana), 21-23 November, 54 p.
266. UNFCCC Secretariat (2004): Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, vulnerability and adaptation to climate change (Final draft report), 145 p.
267. UNFCCC, (1992) Convention Cadre des Nations unies sur les changements climatiques, 33 p.
268. UNFCCC, (2004): Application of methods and tools for assessing impacts and vulnerability, and developing adaptation responses. Background paper, 21st session of Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, Buenos Aires, 6-14 December 2004, 24 p.
269. UNFCCC,(2002) : Lignes directrices pour l'établissement des programmes d'action nationaux aux fins de l'adaptation, Groupe d'experts pour les PMA, juillet 2002
270. UNISDR (2009) : Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe ;39 p
271. VALENCIA. D. Nathalia (2006) : Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis `à vis des séismes et inondations. These de Doctorat, université Marne la Vallée,189 p
272. VINCENT K. 2004. Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa. Working Paper. 56, Tyndall Centre for Climate Change Research 43 p.
273. VISSIN E. W., (1998) : Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de maîtrise 123 p. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin.
274. VISSIN E. W., (2001) : Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA 53 p. Université de Bourgogne, Dijon, France.
275. 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, 284p.
276. VISSIN E. W., BOKO, M., PERARD J., et HOUNDENOU C., (2003) : Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest). In : Publications de l'Association Internationale de Climatologie p 368-376. Volume 15, Besançon, France

277. WAHIBA M ;(2012) : Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger ; université paris Diderot - paris 7 ; Thèse de Doctorat de géographie 330p
278. WANDIGA, S., (2006): Climate Change Induced Vulnerability to Malaria and Cholera in the Lake Victoria Region, AIACC, Project No. AF 91, 90 p.
279. WILHITE D. A., GLANTZ M. H., (1985): Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. Water International, 10, 11-120.
280. YAMASAKI, H, LOUVEL, J ,(2012) : Première étude en vue de développer une méthodologie pour évaluer les vulnérabilités socio-économiques des communautés forestières du Québec aux changements climatiques; 70p
281. YANG, J. et S.D. Prince, (2000): Remote sensing of savannah vegetation changes in Eastern Zambia 1972-1989, International Journal of Remote Sensing 21: 301-332. Z.W. et Rasmussen P.F.) 21-30. IAHS Publ. 240
282. YAO K. (2005) : Origine de l'abondance des ions fer et manganèse dans les eaux de forage du socle de la Côte d'Ivoire : cas de la région de Tiassalé. Mémoire de DEA, Université Cocody 78 p.

<http://www.bothends.org>

<http://www.aiaccproject.org>

<http://www.aivs-bf.info>

<http://www.cilssnet.org>

<http://www.agrhymet.ne>

http://www.sei.se/risk/Mali_French_lowres.pdf

<http://gisweb.ciat.cgiar.org/Vulnerabilidad/index.htm>

http://www.sei.se/risk/Burkina_French_lowres.pdf

http://www.sei.se/risk/Afrique_Ouest_lowres.pdf

<http://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20092011/casdar0911.htm>

Liste des figures

Figure 1: Situation du bassin versant de la Sota	22
Figure 2: Réseau hydrographique du bassin versant de la Sota	24
Figure 3: Unités géologiques dans du bassin versant de la Sota	27
Figure 4: Formations pédologique dans le bassin versant de la Sota	30
Figure 5: Altitude (m) établie à partir d'un MNT de la Sota	32
Figure 6: Régime pluviométrique mensuel des sous bassin versants de la Sota (1960-2010)	36
Figure 7: Evolution de la population par Commune (1979 à 2012)	37
Figure 8: Effectifs de population agricole par Commune en 2006	38
Figure 9: Schéma conceptuel de la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques	59
Figure 10: Répartition des stations dans le bassin versant de la Sota	62
Figure 11: Découpage de bassin versant de la Sota par la polygonaion de THIESSEN.....	67
Figure 12: Principales étapes de l'analyse fréquentielle	89
Figure 13: Organigramme des étapes de cartographie du risque d'inondation:.....	91
Figure 14: Etapes d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique	92
Figure 15: variabilité interannuelle des pluies dans le bassin versant de la Sota (1960-2010)	97
Figure 16: Indice pluviométrique dans les sous bassins versants de la Sota.....	98
Figure 17: Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand dans les séries pluviométriques du bassin versant de la Sota	99
Figure 18: Rupture de la stationnarité par le test de Pettitt dans les sous bassins versants de la Sota	100
Figure 19: Bilan climatique mensuel dans les sous bassins versants	101
Figure 20: Variation du bilan climatique mensuel sur les sous-périodes 1960-1971 et 1971- 2010	102
Figure 21 : Régime pluviométrique des sous périodes 1960-1971 et 1972-2010 dans la Sota	102
Figure 22 : Régime pluviométrique des sous périodes 1960-1971 et 1972-2010 dans les sous bassin de la Sota.....	104
Figure 23: Evolution des températures maximales et minimales dans la Sota (1960-2010)	106
Figure 24: Rythme des températures moyennes maximales dans le bassin versant de la Sota (1960-2010).....	107
Figure 25: Rythme des températures moyennes minimales dans le bassin versant de la Sota (1960-2010).....	107
Figure 26: Régime hydrologique des sous bassins versants de la Sota	108

Figure 27: Variabilité interannuelle des débits annuels à Coubéri et à Gbassè	109
Figure 28: Rupture de stationnalité dans les débits annuels à Coubéri et à Gbassè	110
Figure 29 : Variation du régime hydrologique dans les sous bassin versant de la Sota	110
Figure 30 : Variation interannuelle de l'écoulement dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè	111
Figure 31: Evolution des termes du bilan hydrologique dans les sous bassins versants de Coubéri et de Gbassè	112
Figure 32: Evolution des débits maximaux à Couberi et à Gbassè de 1960-2009	114
Figure 33: Ajustement de la loi de gumbel au débit maximal à Coubéri et à Gbassè	118
Figure 34: Courbes QdF des sous bassins versants de Coubéri et de Gbassè.....	120
Figure 35: Ajustement de la loi de Gumbel sur les sous bassins versants de la Sota	121
Figure 36: Courbes Intensité -Durée-Fréquence dans les stations de la Sota	123
Figure 37: Nombre de jours de pluie dans les sous bassin versant de la Sota de 1960-2010	123
Figure 38 : débits d'étiage à Couberi et à gbassè.....	127
Figure 39 : Occupation des sols dans le bassin versant de la Sota en 1978 ; 1998 ; 2010 .	128
Figure 40: Différentes cartes thématiques pour l'établissement de la carte de vulnérabilité à l'inondation.....	132
Figure 41: Vulnérabilité à l'inondation dans le bassin versant de la Sota	134
Figure 42: Unité d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota	136
Figure 43: (a) Distribution de l'intensité pluviométrique;(b) Couverture du sol.....	138
Figure 44: Aléa d'inondation	140
Figure 45: Zones à risques d'inondation.....	142
Figure 46: Zone agro-écologique dans le bassin versant de la Sota	144
Figure 47: Proportions des écoles inondées par Communes dans le bassin versant de la Sota.....	153
Figure 48: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota.....	169
Figure 49: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à Coubéri	170
Figure 50: Perceptions des populations des périodes d'occurrence des inondations dans le bassin versant de la Sota	170
Figure 51: Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à Gbassè.....	173

Liste des tableaux

Tableau I: Coordonnées des stations hydrométriques de la Sota et leurs superficies.....	63
Tableau II: Répartition de l'échantillon par commune dans le bassin versant de la Sota.....	69
Tableau III: Sévérité de la sécheresse selon la méthode de nombre d'écart type.....	81
Tableau IV: Classe de la sévérité sécheresse selon le SPI	84
Tableau V : barème notation de la sensibilité aux risques hydroclimatiques	93
Tableau VI: Présentation formelle d'une matrice de sensibilité.....	93
Tableau VII : Déficits entre les sous-périodes 1960-1971 et 1971-2010 des mois les plus humides dans le bassin versant de la Sota	103
Tableau VIII: Déficit pluviométrique des mois les plus humides entre les sous-périodes 1960-1971 et 1971-2010 dans les sous bassins versants de la Sota à Gbassè et de Sota à Coubéri.....	104
Tableau IX: Récapitulation de l'impact du déficit des mois humides sur le déficit global entre les sous-périodes 1960-1972 et 1973-2010 dans les sous bassins versants de la Sota.....	105
Tableau X : Déficit des débits écoulés entre les sous-périodes 1965-1970 et 1971-2006 dans les sous bassins versants de la Sota	111
Tableau XI: Etude comparative des différents termes du bilan hydrologique.....	113
Tableau XII: Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux à Sota	119
Tableau XIII: Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de Gumbel	119
Tableau XIV: Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux à Sota.....	121
Tableau XV: Quantiles estimés dans les sous bassins versants de la Sota	122
Tableau XVI: Seuils de sécheresse correspondants aux différents indices au cours de la période 1960-2010	125
Tableau XVII: Fréquence des années sèches 1960-2010	125
Tableau XVIII: Fréquence de différentes classes de la sécheresse au cours de la période 1965-2008.....	126
Le tableau XIX présente l'évolution de la superficie des différentes unités d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota de 1978-2010.	129
Tableau XX : Evolution de la superficie des différentes unités d'occupation du sol dans le bassin versant de la Sota de 1978-2010	129
Tableau XXI: Matrice de sensibilité aux risques hydroclimatiques dans la Zone agro-écologique I	146
Tableau XXII: Matrice de sensibilité aux risques climatiques dans la Zone agro-écologique II et III	148
Tableau XXIII: Principales maladies liées aux risques hydro-climatiques.....	161
Tableau XXIV: perception endogène de l'inondation.....	171
Tableau XXV: Perception endogène des manifestations de la sécheresse.....	175
Tableau XXVI: Quelques variétés de cultures produites dans le bassin versant de la Sota	192
Tableau XXVII: Quelques programmes, projets et structures intervenant dans le bassin versant de la Sota.....	195
Tableau XXIX: Synthèse des besoins en communication des différents acteurs	197
Tableau XXX: Synthèse sur les besoins en renforcement des capacités par secteur prioritaire	199
Tableau XXXI: Répertoire des actions clés à mener et indicateurs de suivi.....	203

Liste des photos

Photo 1: Séance de focus groupe à Malanville.....	70	
Photo 2: Champs du maïs inondés à Bakpara (Kandi)	151	
Photo 3: Complexe scolaire inondée à Madjécali.....	153	
Photo 4: Village de Madjécali enclavé	Photo 5: Village de Gansosso enclavé.....	154
Photo 6: Route coupée sur l'axe Malanville –Tomboutou.....	155	
Photo 7: Habitation écroulée dans le village de kassakou.....	159	
Photo 8: Champ de maïs inondé à Saah	172	
Photo 9: Assèchement d'une mare à Bouka	174	
Photo 10: Billonnage à l'aide de la traction animale à Nikki	185	
Photo 11: Association de cultures de maïs et du gombo à N'dali.....	186	
Photo 12: Mise en valeur rizicole des bas-fonds à Malanville	189	

Liste des planches

Planche 1: Quelques stratégies d'adaptation endogènes aux risques hydro-climatiques dans le bassin de la Sota	187
Planche 2 : Digues d'irrigation à Malanville et maraîchage dans un bas-fond à N'dali	190

Liste des encadrés

Encadré 1 : Propos d'un riziculteur de Malanville	151
Encadré 2 : Propos de deux paysans de Madjécali	172
Encadré 3: Propos d'un paysan de Guéné	174

Annexe

N°	Titre de l'article	Revues de publication
1	Variabilité hydroclimatique et productions agricoles dans la basse vallée de Mono à Djanglanmè (commune de Grand- Popo)	Cahier des maitrises professionnelles (Bénin)
2	Facteurs explicatifs du tarissement des points d'eau en milieu de socle dans le département des collines	Actes du IV ^{ème} Colloque des sciences, Cultures, et Technologies de l'UAC ; Abomey - Calavi , du 23 au 28 Septembre 2013. (Bénin)
3	Analyse fréquentielle des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin	Afrique sciences 10 (2) (2014) 137 – 148. ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info (Côte d'Ivoire)
4	Contamination du <i>tilapia guineensis</i> par le cadmium au niveau du chenal de Cotonou	Revue de Géographie de l'Université d'Ouagadougou. N° : 2013- RGO_58, ISSN : 0796-9694 (Burkina Fasso)
5	SIG et télédétection pour l'optimisation de la cartographie des risques d'inondation dans le bassin de la Sota au Bénin	Rev. Ivoir. Sci. Technol., 23 (2014) 137 – 152. ISSN 1813-3290, http://www.revist.ci (Côte d'Ivoire)
6	Oculopathy within workers of Beninese cement industry of Xwladodji (BCI) in Cotonou (Benin)	International Research journal of public and Environmental Health. Vol (1), pp 158-164. Available online at http://www.journalissues.org/IRJPEH/ ISSN 2360-8803 (USA)
7	Variabilité hydro pluviométrique et effets socio-économiques dans le bassin versant de la Sota au nord du Bénin	Les Cahiers de CBRST, N° 3 juin 2013 ; Revue scientifique semestriel, deuxième trimestre 2012, Bibliothèque National du Bénin ; ISSN : 1840-703 X (Bénin)

Table des matières

Dédicace.....	1
Sommaire.....	2
Liste des sigles et abréviations	5
Avant-Propos.....	7
Résumé	9
Summary	10
Introduction	11

PREMIERE PARTIE

CADRE THEORIQUE, CONCEPTUEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES

CHAPITRE I :

CADRE THEORIQUE CONCEPTUEL , FONDEMENTS PHYSIQUES ET HUMAINS DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES

1-1.Cadre théorique	16
1-1-1. Problématique.....	16
1-1-2. Objectifs de recherche	20
1-1-3. Hypothèses de travail	20
1-2. Fondements physiques et humains de l'étude.....	20
1-2.2. Fondements physiques du bassin versant de la Sota.....	23
1-2.2.1. Réseau hydrographique.....	23
1-2.2.2. Contexte hydrogéologique	24
1-2.2.3. Formations pédologiques.....	27
1-2.2.4. Relief.....	31
1-2.2.5. Couvert végétal dans le bassin versant de la Sota	32
1-2.2.6 Contexte climatique du bassin versant de la Sota	33
1-3. Fondements humains de la vulnérabilité du bassin versant de la Sota	36
1-3.1. Caractéristiques démographiques	36
1-3-2. Activités économiques dans le bassin versant	37
1-3-2-1. Agriculture.....	37
1-3-2-2. Elevage.....	38
1-3-2-3. Pêche.....	39
1- 4 Point des connaissances	40
1- 4-1. Dynamique de la variabilité climatique.....	40
1- 4.2. Risques hydroclimatiques liés aux phénomènes extrêmes	44
1-4.3. Stratégies d'adaptation aux risques hydroclimatiques	48

1-5. Clarification des concepts	49
1-6. Cadre conceptuel de la vulnérabilité aux risques hydroclimatiques.....	58
Conclusion partielle	Erreur ! Signet non défini.

CHAPITRE II
APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA VULNERABILITE AUX RISQUES
HYDROCLIMATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA

2-1. Nature et source des données utilisées	61
2-1-1. Données climatologiques.....	61
2-1-2. Données environnementales	63
2-1-3. Critique des données	64
2-1-4 Comblement des données manquantes	64
2-1-5. Estimation des champs de pluie	65
2-2. Techniques de collecte des données.....	67
2-3 Méthodes de traitement des données.....	70
2-3-1. Méthode de caractérisation hydropluviométrique	71
2-3-2. Détection des dates de rupture dans les séries temporelles	71
2-3-4. Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame écoulée	74
2-3-5. Etude du bilan climatique.....	74
2-3-6.Méthode d'étude du bilan hydrologique	75
2-3-7. Méthode de traitement des données environnementales	78
2-3-8-1. Indice de l'écart à la moyenne	79
2-3-8-2. Rapport à la normale des précipitations	79
2-3-8-3. Indice de déficit pluviométrique (Indice de l'écart à la normale)	80
2-3-8-4.Indice de pluviosité	80
2-3-8-5. Méthode des écarts types.....	81
2-3-8-6. Indices de sévérité de la sécheresse.....	82
2-3-9. Méthode d'analyse de risque d'inondation.....	84
2-3-9-1. Analyse fréquentielle	84
2-3-9-2. Méthode de détermination de l'aléa d'inondation	89
2-3-9-3. Méthode de détermination de la vulnérabilité à l'inondation.....	90
2-3-9-4. Méthode de détermination des zones à risque d'inondation	90
2-3-9-5.. Méthode de détermination de la vulnérabilité socio-économique.....	92
DEUXIEME PARTIE.....	95
CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE ET INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI	95

**CHAPITRE III:
CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN
VERSANT DE LA SOTA**

3-1. Variabilité climatique dans le bassin versant de la Sota	96
3-1-1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota	97
3-1-2. Variation pluviométrique dans les sous bassins versants de la Sota	98
3-1-1-2. Rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques	98
3-1-3. Détection de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques des différents sous bassins versants	99
3-2. Bilan climatique	100
3-2-1. Bilan climatique mensuel dans les sous bassins versants	100
3-1-3. Déficits de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota	104
3-1-4. Etude de la variabilité des températures dans le bassin versant de la Sota	106
3-1-4-1. Variabilité inter annuelle de la température	106
3-1-4-2. Variabilité inter mensuelle de la température	107
3-3. Variabilité hydrologique dans les sous bassins versants de la Sota	108
3-3-1. Variation interannuelle des débits dans les sous bassins versants de la Sota	109
3-3-3. Variabilité interannuelle de l'écoulement dans les sous bassins versants de la Sota	110
3-4. Bilan hydrologique du bassin versant versant de la Sota	112
3.6- Evolution des débits maximaux dans les sous bassin versant de la Sota	114
Conclusion partielle	Erreur ! Signet non défini.

**CHAPITRE IV:
ANALYSE DE L'INFLUENCE DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LES
ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA**

4-1. Analyse des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	117
4-1-1-1. Caractérisation de l'aléa hydrologique	118
4-1-1-1-1. Fréquence des débits maximaux dans les sous bassins versants de la Sota	118
4-1-1-1-2. Intensité des débits maximaux journaliers	120
4-1-1-2. Caractérisation de l'aléa pluviométrique	120
4-1-1-2-1. Fréquence des pluies maximales journalières bassins versants de Sota	120
4-1-1-2-2. Intensité des pluies maximales dans le bassin versant	122
4-1-1-3. Durée des évènements hydropluviométriques dans le bassin versant	123
4-1-2. Caractérisation de la sécheresse	124
4-1-2.-1. Caractérisation de la sécheresse météorologique	124
4-1-2.-2. Sécheresse hydrologique	126
4-2. Facteurs de vulnérabilité du bassin versant aux risques hydroclimatiques	127
4-3. Vulnérabilité du bassin versant de la Sota	130

4-3-1. Vulnérabilité biophysique dans le bassin versant de la Sota	130
4-3-1-1. Vulnérabilité à l'inondation	131
4-3-1-2 .Aléa d'inondation	135
4-3-1-3. Risque d'inondation dans le bassin versant de la Sota	141
4-3-2. Vulnérabilité socio-économique du bassin versant de la Sota.....	143
4-3-2-1. Présentation de la zone Agro-écologique I dans le bassin versant	145
4-3-2-2. Sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques	146
4-3-2-3. Présentation de la zone agro-écologique II et III dans le bassin versant	146
4-3-2-4. Sensibilité des secteurs d'activités aux risques hydroclimatiques	147
4-4. Vulnérabilité des écosystèmes aux risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	148
4-4-1. Incidences des risques climatiques sur les ressources en eaux	149
4-4-1-1. Chaleurs excessives.....	149
4-4-1-2. Pluies tardives	149
4-4-1-3. Mauvaise répartition des pluies	150
4-4-1-4. Inondations	150
4-4-2. Incidences des risques hydro-climatiques sur les infrastructures socio-économiques	152
4-4-3 Influence des risques hydroclimatiques sur le secteur agricole et sécurité alimentaire....	155
4-4-5. Influence des risques hydro-climatiques sur l'élevage.....	157
4-4-6. Influence des risques hydro-climatiques sur les établissements humains et la santé	158
Conclusion partielle	Erreur ! Signet non défini.

TROISIEME PARTIE

PERCEPTION DES MANIFESTATIONS DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET STRATEGIES D'ADAPTATION DANS BASSIN VERSANT DE LA SOTA A L'EXUTOIRE DE COUBERI

CHAPITRE V: PERCEPTIONS PAYSANNES DES MANIFESTATIONS DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES

5-1. Indicateurs de l'avènement des risques hydroclimatiques.....	167
5-2. Perceptions paysannes des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	169
5-2-2. Perceptions des manifestations des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Gbassè	173
5-2-3. Limite de la perception des risques hydroclimatiques	176
5-2-4. Discussion.....	176
Conclusion partielle	177

**CHAPITRE VI:
STRATEGIES D'ADAPTATION AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN
VERSANT DE LA SOTA**

6-1. Stratégies institutionnelle, juridique et organisationnelle de gestion des risques dans la Sota	178
6-1-1. Cadre institutionnel, juridique et organisationnel de gestion des risques et catastrophes au Bénin.....	179
6-1-2. Processus de gestion des risques hydroclimatiques	182
6-2. Stratégies endogènes	184
6-2-1. Techniques et méthodes de culture.....	184
6-2-2. Stratégies alternatives développées par les paysans.....	187
6-3. Stratégies exogènes	188
6-3-1. Recours aux bas-fonds et plaines alluviales.....	188
6-3-2. Recours aux nouvelles espèces et variétés des cultures	191
6-3-3. Utilisation de fertilisants organiques et reboisement.....	193
6-3-4. Actions menées par les structures et subventions de la production	194
6.4. Suggestions.....	196
6.4.1- Actions pour le renforcement des capacités pour la réduction des risques hydroclimatiques	196
6-4-2. Renforcement des capacités par secteur prioritaire	199
6-4-3.Perspectives pour une meilleure adaptation aux les risques hydroclimatiques dans le bassin versant de la Sota	202
Conclusion.....	207
Bibliographie.....	211