



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENTS DES EAUX ET FORETS

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome,
Spécialisation Eaux et Forêts

Année académique 2012-2013

**ANALYSE DE L'EVOLUTION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DU
CENTRE NORD DE BURKINA FASO**

Présentée par : **RAMAROSON Maminirina Suzannah**

Soutenu le 23 Aout 2013

Devant le jury composé de :

Président : Dr Zo RABEMANANJARA

Tuteur: Dr Harifidy RAKOTO RATSIMBA

Examineur(s): Pr Samuel RAZANAKA

Mr Navale RATOVOSON



Promotion : « **AMBIOKA** »



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENTS DES EAUX ET FORETS

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome,
Spécialisation Eaux et Forêts

Année académique 2012-2013

ANALYSE DE L'EVOLUTION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS
DU CENTRE NORD DE BURKINA FASO



Présentée par : **RAMAROSON Maminirina Suzannah**

Soutenu le 23 Aout 2013

Devant le jury composé de :

Président : Dr Zo RABEMANANJARA

Tuteur: Dr Harifidy RAKOTO RATSIMBA

Examineur(s): Pr Samuel RAZANAKA

Mr Navale RATOVOSON



Promotion : « AMBIOKA »

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ENCADREMENT



WASCAL (Centre Ouest-Africain de Service Scientifique sur le Changement Climatique et l'Utilisation Adaptée des Terres) est un programme de recherche, conçu pour répondre au défi du changement et de la variabilité croissante du climat et accroître la résilience des systèmes humains et environnementaux. Pour ce faire, WASCAL se propose de renforcer, l'infrastructure et les capacités de recherche dans le domaine du changement climatique en Afrique de l'Ouest, en mettant ensemble l'expertise de dix pays de la région et celle d'institutions Allemandes.

WASCAL est financé par le Ministère Fédéral Allemand de l'Education et de la Recherche (BMBF). Le projet est coordonné par le Centre de Recherche pour Développement (ZEF) de l'Université de Bonn et il est mis en œuvre grâce à la collaboration effective entre partenaires de l'Afrique de l'Ouest et de la République Fédérale d'Allemagne.

Les trois composantes principales de WASCAL sont:

- ✓ Le centre de compétence : travaille pour la création et l'amélioration d'outils et de réseaux de collecte, de traitement, de stockage et de dissémination de données et d'informations.
- ✓ Le programme de recherche principale : concerne l'utilisation adaptée des terres et leur gestion sous des conditions changeantes de climat.
- ✓ Le programme de recherche doctorale : appuie et facilite la formation universitaire en Afrique de l'Ouest en partenariat avec des institutions allemandes.

PRESENTATION DES PARTENAIRES



Le programme PIMASO s'inscrit dans le cadre de deux engagements politiques importants de l'Union européenne (UE) vis-à-vis de l'Union africaine (UA) et du groupe des Etats d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique (ACP) .L'objectif du programme est de promouvoir le développement durable et la lutte contre la pauvreté en augmentant la disponibilité de ressources humaines professionnelles et qualifiées de haut niveau dans les pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique. Le programme vise d'une part, à renforcer la coopération entre les établissements d'enseignement supérieur (EES) dans la région ACP, afin d'accroître l'accès à une éducation de qualité qui incitera et permettra aux étudiants ACP d'entreprendre des études de deuxième et/ou troisième cycle, et d'autre part, à favoriser la permanence des étudiants dans la région, ainsi que la mobilité du personnel (académique et administratif) tout en augmentant la compétitivité et l'attractivité des établissements eux-mêmes.

Notre mobilité a été effectuée à l'Université de Ouagadougou notamment dans le Laboratoire des Matériaux et Environnements (LAME) qui est cité comme un bel exemple de brassage réussi entre étudiants d'horizons divers.

REMERCIEMENTS

Gloire à Dieu Tout Puissant qui nous a donné la santé, la force et le courage durant la préparation de ce mémoire.

Nous tenons par la suite à remercier de nombreuses personnes sans qui ce manuscrit n'aurait pas pu se faire :

Nous adressons nos remerciements les plus sincères au Dr Zo RABEMANANJARA, de la division Politique et Economie des Ressources Naturelles du département des Eaux et Forêts de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques qui, malgré ses multiples occupations, a accepté la grande responsabilité de présider notre soutenance.

Nous remercions également le Pr François ZOUGMORE, Directeur du Laboratoire de Matériaux et Environnements et coordonnateur du programme PIMASO à l'Université d'Ouagadougou de nous avoir accueillis et dirigés nos travaux de recherche.

Nous remercions chaleureusement notre tuteur, Dr Harifidy RAKOTO RATSIMBA, du département des Eaux et Forêts de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de Madagascar pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et instructions qu'il nous a apporté malgré la distance qui nous a séparés.

Nous adressons également nos remerciements au Dr BARRY Boubacar, Directeur du centre de compétence WASCAL à Ouagadougou de nous avoir accueillis dans son institution et au Dr IBRAHIM Boubacar chercheur hydroclimatologue au centre de compétence WASCAL pour son encadrement et pour les critiques amélioratrices qu'il nous a apportées.

Nous remercions le Pr Samuel RAZANAKA du CNRE à Madagascar et Mr Navale RATOVOSON de nous avoir fait l'honneur de juger ce travail d'initiation à la recherche.

Nous exprimons une profonde reconnaissance à la Direction Générale de la Météorologie de Ouagadougou de nous avoir procurés les données climatiques.

Nous tenons à remercier tout l'ensemble des corps enseignant de l'Université de Ouagadougou et de l'ESSA pour leur encouragement.

Nous remercions également toute l'équipe du Laboratoire de Matériaux et Environnement pour leur soutien tout au long des étapes des travaux.

Un grand merci à nos parents, nos frères et nos proches pour leur réconfort et écoute ainsi que l'amour dont ils n'ont pas cessé de nous témoigner.

Nos sincères gratitude à tout ce qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

RESUME

Depuis un certain moment les pays de l'Afrique de l'Ouest dont le Burkina Faso, connaissent un changement anormal du climat. Cette étude a pour objectif d'évaluer la variabilité du régime pluviométrique dans un contexte de changement climatique dans la région Centre Nord du Burkina Faso où la sensibilité à la variation pluviométrique est forte. Il s'agit de caractériser cette variabilité à partir de l'analyse de certains facteurs tels que la température de l'air, l'humidité relative de l'air mais aussi la fréquence des jours pluvieux et la durée des saisons pluvieuses. Une analyse en composante principale normée permet l'analyse du degré de corrélation des facteurs suscités sur le régime pluviométrique. Ensuite, il est question de mettre en évidence la rupture pluviométrique sur la période 1972-2012 afin de dégager le comportement des régimes pluviométriques dans le contexte du changement climatique. En outre, la répartition spatiale du régime pluviométrique sur toute la région a été cartographiée à l'aide des indices pluviométriques et de la pluviométrie annuelle brute. Enfin la tendance future des paramètres pluviométriques a été également mise en exergue. La variabilité du régime pluviométrique se manifeste par une diminution de la fréquence des jours pluvieux et une réduction de la durée de la saison de pluie à partir de l'année 1983. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'il y a eu une baisse de l'humidité relative de l'air et une hausse de la température de l'air alors que ce sont des facteurs de la variabilité temporelle des régimes pluviométriques saisonniers. La répartition spatiale montre que ce déficit pluviométrique se manifeste dorénavant dans la partie Sud et Est de la région. L'analyse de la variabilité pluviométrique future sur la période de projection de 2013-2025 montre diverses tendances pour les indices pluviométriques annuelles : une tendance significative à la baisse pour le modèle statistique ARIMA et une tendance significative à la hausse pour le modèle climatique régionale RACMO tourné sous le scénarios A1B du GIEC .Vu que tous les résultats de projection ne sont pas optimistes, les enjeux environnementaux sont très critiques ; d'où un besoin de renforcement des capacités d'adaptation des paysans et des acteurs locaux .

Mots clés : changement climatique, régime pluviométrique, variabilité pluviométrique, Centre Nord, Burkina Faso.

ABSTRACT

Since some time West African countries, including Burkina Faso, experiencing abnormal climate change. The aim of this study is to estimate the rainfall variability in the context of climate change in the Northern Center of Burkina Faso where sensitivity to rainfall variability is strong. It is firstly to characterize the variability from the analysis of the most relevant parameters such as air temperature, relative humidity, and the frequency of rainy days and the duration of rainy seasons. A standardized principal component analysis allows the analysis of the correlation of factors mentioned above on rainfall pattern. Then it comes to highlight the breaking rainfall over the period 1982-2012 in order to identify the behavior of rainfall patterns in the context of climate change. In addition, the spatial distribution of rainfall across the region is mapped using rainfall indices and gross annual rainfall. Finally, the future trend of rainfall parameters was highlighted as well. Rainfall variability is manifested by a decrease in the frequency of rainy days and a reduction in the rainy season's duration from 1983. This phenomenon can be explained by the fact that there has been a decline in the relative humidity and an increase in air temperature while these are factors of the temporal variability seasonal rainfall patterns. The spatial distribution shows that the rainfall deficit is now evident in the South and Eastern parts of the region. The analysis of future rainfall variability on the projection period of 2013-2025 shows various trends in annual rainfall indices: a significant downward trend for the ARIMA statistical model and a significant upward trend for the regional climate model RACMO under the A1B scenario of GIEC. Since all the projection results are not encouraging, environmental issues are extremely critical. So, a building adaptive capacity of farmers and local stakeholders are recommended.

Key words: climate change, rainfall, rainfall variability, Northern Center, Burkina Faso,

FAMINTINANA

Fotoana vitsivitsy lasa izay dia tsapa fa nisy fiovana tsy araka ny tokony ho izy ny toetrandro tamin'ny ireo firenena ao Afrika Andrefana, anisan'izany Burkina Faso. Ny tanjon'ity fanadihadiana ity dia ny hamaritra ny fiovaovan'ny haben'ny rotsakorana amin'ny fotoana sy toerana voafaritra dinihina ao anatin'ny fiovan'ny toetrandro ao amin'ny faritra afovoany avaratr' i Burkina-Faso. Ao amin'ny io toerana io no tsapa fa tena manjaka sy miovaova tsy araka ny tokony ho izy ny haben'ny rotsak'orana. Mba hampazava kokoa io fiovaovana io dia havoitrako amin'ny alalan'ny fanadihadiana ireo anton-javatra sasan-tsasany izay mitarika izany. Anisan'izany ny hafanan'ny rivotra; hamandoana rivotra ary koa ny fiverimberenan'ny andro manorana sy ny faharetan'ny fatom-pahavaratra. Ny fanadihadiana ireo tranganjavatra ireo araka ny lalany natiora amin'ny alalan'ny ilay teknika atao oe « ACP » dia ahafahana mikaroka ny tahany finfadraisana sy fifampiankian'ireo zavatra voalaza mahakasika ny habeny rotsakorana ireo. Manarak'izany ny fiovana misy eo amin'ny filatsakin'ny rotsakorana mandritra ny taona 1972-2012 no nahafantarana ny toetoetriny habeny rotsakorana anatin'ny fotoana iray dinihina araky ny fiovan'ny toe-trandro. Fanampin'izany ny fitsinjarany rotsakorana manerana ny faritra dia voamarika eo amin'ny saritany amin'ny alan'ny haben'ny rotsakorana sy fandrefesana izany isan-taona amin'ny ankapobeny. Farany anisan'ny aseho mibaribary koa ny fombafombany hoaviny firosahan-korana. Ny fiovaovany habeny rotsakorana dia miseho amin'ny alalan'ny fihenany andro manorana sy faharetany fotoam-pahavaratra nanomboka tamin'ny taona 1983. Io tranganjavatra io dia azo azavaina amin'ny alalan'ny fihenany hamandoan'ny rivotra sy ny fiakaran'ny hafanany maripanan-drivotra. Ireo anefa dia fototra ny fiovaovana tsy maharitra ny habeny rotsakorana amin'ny fotoana iray. Ny fitsinjarana ara-paritra dia mapiseho fa io tsy fahampiny haben'ny rotsakorana io dia mitranga any amin'ny faritra Atsimo Antsinana izay tsapa manomboka izao. Ny fanadihadiana ny fiovaovany'ny hoaviny habe ny rotsakorana vinavinaina ao anatin'ny taona 2013-2025 dia mapiseho endrika samy hafa ny toetoetrin'ny rotsakorana isan-taona : mirona bediabe any amin'ny fihenany rotsakorana araka ny modelin' antotanisa ARIMA sy any amin'ny fiakaran'izany araka ny endrikiny toetrandro ny faritra RACMO izay manaraka ilay vinavina A1B novokarin'ny GIEC. Araky ny fantatra ny vokatin'ny vinavina rehetra dia tsy hanana fanantenana, ny mahakasika ny mahasarobidy ny tontolo iainana. Izany no tokony hanomezana fanamafisana fahaiza manao ny tantsaha sy ny olona mamokatra rehetra ao an-toerana mifanaraka amin'ny io fiovan'ny toe-trandro io.

Teny manan-danja: fiovaovan'ny rotsakorana ,fiovan'ny toetrandro, haben ny rotsakorana, faritra avaratra afovoany, Burkina Faso

TABLE DES MATIERES

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ENCADREMENT	i
PRESENTATION DES PARTENAIRES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
FAMINTINANA.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTES DES FIGURES.....	x
LISTE DES CARTES	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xi
LISTE DES ACRONYMES	xii
GLOSSAIRE.....	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : CADRE D'ETUDE ET METHODOLOGIE	3
1. Constats sur le changement climatique.....	3
1.1. Constats sur le changement climatique à l'échelle mondiale.....	3
1.2. Constats sur le changement climatique à l'échelle de l'Afrique de l'ouest	4
1.3. Constats sur le changement climatique à l'échelle du Burkina Faso	5
2. Problématique et hypothèses.....	8
3. Description de la zone d'étude et son intérêt	9
3.1. Le milieu physique	10
3.2. Le milieu naturel	11
3.3. Le milieu humain	12
4. Matériels et méthodes	13
4.1. Revue sur les méthodes d'analyse de l'évolution de la pluviométrie	13
4.2. Les données et outils	15
4.3. Approches méthodologiques	16
4.4. Cadre opératoire	23

CHAPITRE II : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	24
1. Analyse de la variabilité temporelle du régime pluviométrique et les facteurs influençant	24
1.1. Variabilité des nombres de jour de pluie, du cumul annuel, du début et de la fin de la saison des pluies	24
1.2. Variabilité des températures et humidités relatives de l'air	36
1.3. Détermination des facteurs climatiques qui influencent la pluviométrie	39
2. Analyse de la répartition spatiale de la pluviométrie	43
2.1. Cartographie de l'indice pluviométrique.....	43
2.2. Cartographie des pluies moyennes annuelles décennales	45
3. Profil du régime pluviométrique à l'horizon 2025.....	47
3.1. Prévisions des tendances pluviométriques par le modèle ARIMA	47
3.2. Projection des tendances pluviométriques à partir des données pluviométriques simulés.....	50
Chapitre III : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	52
1. Discussions	52
2. Recommandations : pistes d'adaptation.....	54
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	57
REFERENCES.....	59
ANNEXES	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des stations météorologiques retenues.....	16
Tableau 2: Cadre opératoire	23
Tableau 3: Résultats du test de Mann-Kendall sur le période de 1972-2012 pour le nombre de jour de pluie (P).....	25
Tableau 4: Résultats du test de Mann-Kendall sur le période de 1972-2012 pour les cumuls annuels de pluies	27
Tableau 5: Résultats du test de Pettitt sur la période de 1972-2012 appliqués au nombre de jour de pluie (P) et aux classes de pluie (P1, P2, P3 et P4).....	28
Tableau 6: Comparaison du nombre moyen de nombre de jour pluvieux avant et après rupture	28
Tableau 7: Résultats du test de Pettitt sur le période de 1972-2012 pour les cumuls annuels de pluies	32
Tableau 8: Récapitulation des caractéristiques de la saison de pluie de deux stations dans la région du Centre Nord.....	36
Tableau 9: Températures mensuelles aux stations de Bogande (1980-2011)	37
Tableau 10: Humidités relatives mensuelles moyennes (%) à Bogande sur la période 1980 à 2011	38
Tableau 11: Matrice de corrélation des variables analysées à la station de Bogande :.....	40
Tableau 12: Valeurs propres des variables analysées à la station de Bogande	40
Tableau 13: Cadre logique	56

LISTES DES FIGURES

Figure 1:Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde de 1970 à 2004	3
Figure 2:Indice de pluie (IPS) du Sahel sur la période allant de 1950 à 2006	4
Figure 3:Pourcentage pluviométrique des classes de pluies par rapport au nombre annuel de pluie pour la période 1972-2012	24
Figure 4: Courbe de tendance des nombres de jours de pluies à Kongoussi.....	25
Figure 5:Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Bourzanga	
Figure 6:Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Kaya.....	26
Figure 7:Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Tougouri	
Figure 8:Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Bogande.....	26
Figure 9: Courbe de corrélation entre le nombre moyen de jour de pluie et le cumul annuel moyen de pluie	27
Figure 10: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Kaya (1972-2012)	29
Figure 11: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Bogande (1972-2012)	30
Figure 12: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Tougouri (1972-2012).....	31
Figure 13:Variabilité du début et de la fin des saisons des pluies à la station de Kaya par décennie pendant les périodes 1972-2012.....	33
Figure 14:Variabilité du début et de la fin des saisons des pluies à la station de Kongoussi par décennie pendant les périodes 1972-2012.....	35
Figure 15:Variations interannuelles de la température de l'air à Bogande (1980-2011).....	37
Figure 16:Diagramme ombrothermique (1980-2011) à Bogande.....	38
Figure 17:Variations interannuelles de l'humidité relative de l'air de 1998 à 2011 à Bogande	39
Figure 18: Cercles de corrélations des variables analysées à la station de Bogande	42
Figure 19: Evolution des indices pluviométriques moyens avec ARIMA pour la période 1972-2012	48
Figure 20: Evolution des indices pluviométriques moyens prédits avec ARIMA pour la période 2013-2025.....	48
Figure 21: Evolution des indices pluviométriques moyens prédits le modèle RACMO pour la période 2013-2025.....	50

LISTE DES CARTES

Carte 1: Migration des isohyètes 600mm, 800mm, 1000mm de 1951 à 2000 au Burkina Faso	6
Carte 2: Domaines climatiques du Burkina Faso 1951-1980 et 1971-2000	7
Carte 3: Localisation de la région du Centre Nord au Burkina Faso	10
Carte 4: Stations pluviométriques retenues	16
Carte 5: Répartition spatiale de l'indice pluviométrique moyenne décennale de la série 1972 - 2012.....	44
Carte 6 : Répartition spatiale des pluies moyenne décennales de la série 1972 - 2012	46
Carte 7: Répartition spatiale des indices pluviométriques prédissent avec le modèle ARIMA	49
Carte 8 : Répartition spatiale des indices pluviométriques projetés avec le modèle RACMO51	

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Nombre de jour pluie et fréquences de jours de pluies à différent classe de hauteur par an pour chaque station.....	I
Annexe 2: Pourcentage des jours pluvieux par pentades (du 1er Mars au 31 octobre) pour la station de Kongoussi à chaque décennie de la série (1972-1983).....	VI
Annexe 3: Pourcentage des jours pluvieux par pentades (du 1er Mars au 31 octobre) pour la station de Kaya à chaque décennie de la série (1972-1983).....	VII
Annexe 4: Températures maximale et minimale annuelles pour la station de Bogande.....	VIII
Annexe 5: Humidité relative maximale et minimale annuelle pour la station de Bogande	IX
Annexe 6: Résultat des calculs des indices pluviométriques	X
Annexe 7: Pluviométrie moyenne par trentenaire pour chaque station.....	XI
Annexe 8: Précipitation mensuelle pour la station de Bogande	XI
Annexe 9: Résultat de la modélisation des paramètres pluviométriques avec le modèle ARIMA	XII
Annexe 10: Les totaux pluviométriques annuels pour chaque station	XXI
Annexe 11: Tableau de valeur de l'ACP pour la station de Bogande.....	XXII

LISTE DES ACRONYMES

ACP	Analyse en Composante Principale
AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unis sur le Changement Climatique
CEDEAO	La Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CSAO	Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest
CILSS	Comité Inter-état de Lutte Contre la Sècheresse au Sahel
CT	Court Terme (1ans)
DGAT	Direction Générale de l'Aménagement du territoire
DGM	Direction Générale de la Météorologie
DRAH	Direction Régionale de l'Agriculture et de l'Hydraulique
DRECV	Direction Régionale de l'Environnement et du Cadre de Vie
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernementale d'Expert en Changement Climatique
ICRISAT	Institut Internationale de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides
IDW	Inverse Distance Weigthing
MAH	Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique
MECV	Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie
MEF	Ministère de l'Economie et des Finances
MT	Moyen Terme
IOV	Indicateur Objectivement Vérifiables
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
PANA	Programme d'Action nationale d'Adaptation au Changement Climatique
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model
RGPH	Recensement Générale de la Population et de l'Habitation
SDV	Source De Vérification
SP/CONNED	Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le développement durable

GLOSSAIRE

[1] **Vulnérabilité** : degré d'exposition d'un système, ou incapacité du système à faire face aux effets négatifs du changement climatique, y compris la variabilité du climat ou les phénomènes extrêmes.

[2] **Variabilité climatique** : variation de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts-types, apparition d'extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales autres que celles de phénomènes météorologiques particuliers.

[3] **Changement climatique** : variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement de l'ordre des décennies ou plus).

[4] **Régime pluviométrique** : En un lieu donné, c'est la répartition de la moyenne du cumul annuel des précipitations entre les différents mois de l'année.

[5] **Adaptation** : mesure prise pour faire face à l'évolution du climat, par exemple, à l'augmentation des précipitations, à la hausse des températures, à la raréfaction des ressources en eau ou à la fréquence accrue des tempêtes.

[6] **Pentade** : période de cinq jours

[7] **Série temporelle** : suite réelle finie $(x_t) 1 \leq t \leq n$, où t représente le temps (en minute, jour, année...)

[8] **Modèle climatique** : Simulation, par informatique, des évolutions possibles du climat terrestre.

[9] **Scénario A1B** : C'est un scénario intermédiaire représentée par un mix énergétique qui caractérise les conditions moyennes du changement climatiques

[10] **Cordon pierreux** : dispositifs anti - érosifs composés de blocs de moellons ou de pierres disposées en une ou plusieurs rangées le long des courbes de niveaux.

[11] **Zai** : ou système de trous à semis (demi-lunes), est creusé généralement au mois de Février, dans lesquels on met de la fumure pour attendre la saison pluvieuse. Ainsi, lorsqu'il y a une forte pluie, les trous sont refermés pour y semer les grains. La technique conduit à l'amélioration et à la récupération des terres dégradées (zipéllé).

INTRODUCTION

De tout temps, le climat terrestre n'a jamais été statique. Il est sujet à des variations qui se produisent à des échelles de temps variant de la décennie au millénaire voire des millions d'années (OMM, 2003). Pour le cas des pays de l'Afrique de l'Ouest et particulièrement ceux de la zone sahélienne connaissent depuis la fin des années 1970 une modification du climat se traduisant par une élévation significative de la température moyenne annuelle, une baisse significative des précipitations et une augmentation des événements extrêmes (Agrhymet, 2010). Cela a entraîné de longues poches de sécheresse au sein de la saison des pluies ou des phénomènes d'inondation, rendant ces populations vulnérables face aux aléas climatiques. L'accentuation de la fragilité ou de la vulnérabilité [1] du milieu s'inscrit dans le contexte de la variabilité climatique [2] et de la précarité des conditions socio-économiques des populations qui, face à la pauvreté, n'accordent pratiquement pas d'intérêt aux discours écologiques. En effet, ce cas se présente aussi au Burkina Faso, notamment la région du centre Nord, l'action anthropique s'exerce notamment par l'exploitation des forêts et des gisements miniers, les pratiques pastorales et la culture attelée (MAH, 2011). L'ensemble de ces pressions humaines, conjuguées au déficit pluviométrique sur une zone déjà écologiquement fragile, accélère le processus de dégradation de l'environnement. Ainsi, les études d'éventuels « changements climatiques » [3] avec les manifestations extrêmes que cela pourrait entraîner constituent un enjeu important pour la communauté scientifique et les décideurs politiques en raison de leurs conséquences immédiates et durables sur l'environnement.

En outre, plusieurs études ont été réalisées au Burkina Faso en vue de comprendre les phénomènes intervenants dans le changement du climat (Ouedraogo *et al.*, 2010 ; Sarr, 2011 ; Traore, 2012 ; Bationon, 2009). Cependant des questions restent toujours sans réponses et les connaissances sur l'évolution du climat sont encore confuses voire contradictoires. Il existe une divergence entre les modèles de projection du climat pour tout l'Afrique de l'Ouest: certains projetant une sécheresse significative ; d'autres un retour progressif de l'humidité (GIEC, 2007). En effet, pour le Burkina Faso, la situation est très complexe, une fluctuation marquée de la pluviométrie est observée, en raison de l'influence de la mousson Ouest africaine (Livre blanc de l'AMMA, 2012) et aggravée par le changement climatique. L'analyse de l'évolution des précipitations dans le Centre Nord et les tendances susceptibles d'y être détectées sont du plus grand intérêt pour une région où les ressources hydriques

constituent un enjeu économique majeur pour les populations locales en majorité rurale et pour la gestion durable de l'environnement. Dans ce cadre, cette étude vise à contribuer à une meilleure analyse de l'évolution du climat, *il s'agit d'analyse de l'évolution du régime pluviométrique[4] dans la région du centre Nord de Burkina Faso dans un contexte de changement climatique* en vue de proposer une stratégie d'adaptation[5] face aux enjeux environnementaux résultants.

Pour bien comprendre la problématique évoquée, les grandes lignes suivantes vont être explicitées: en premier lieu la synthèse bibliographique, puis le cadre de l'étude et la méthodologie, ensuite les résultats et les interprétations, et en dernier lieu les discussions et les recommandations.

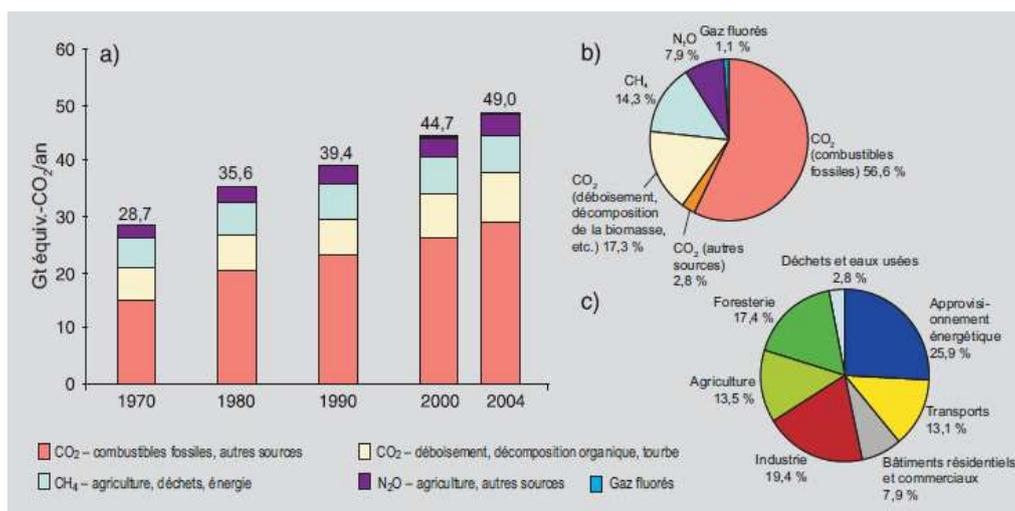
CHAPITRE I : CADRE D'ETUDE ET METHODOLOGIE

Cette partie donne et récapitule les études ayant abordés le thème dans le monde et au Burkina Faso, notamment les travaux qui permettront de cadrer cette étude. Ensuite, un aperçu sur les méthodes d'analyse du régime pluviométrique et les méthodes choisies pour les traitements des données seront détaillées. Le second objet de ce présent chapitre est de faire une présentation du milieu physique, humain et des activités socio-économiques de la zone d'étude en fonction des objectifs de l'étude préalablement définis.

1. Constats sur le changement climatique

1.1. Constats sur le changement climatique à l'échelle mondiale

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992), les Changements climatiques sont tous changements attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. La modernisation de l'industrie et des modes de vie a créé de nouvelles sources de gaz à effet de serre, et des gaz totalement nouveaux ont été émis dans l'atmosphère. Les émissions mondiales de GES imputables aux activités humaines ont augmenté depuis l'époque préindustrielle ; la hausse a été de 70 % entre 1970 et 2004.



Source : GIEC, 2007

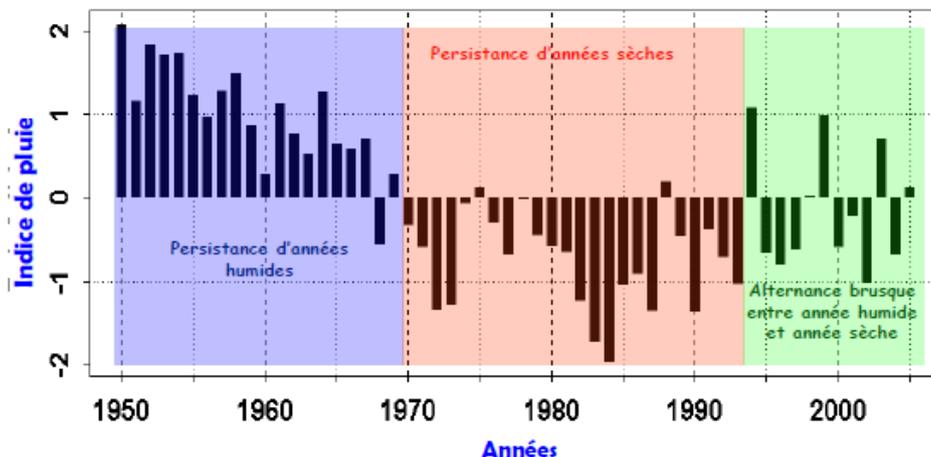
Figure 1: Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde de 1970 à 2004

En effet, selon le GIEC, à l'échelle mondiale, l'essentiel du réchauffement des cinquante dernières années est attribuable aux activités humaines. Dès 1976, la hausse de température moyenne mondiale s'est nettement accélérée, atteignant 0,18°C par décennie (OMM, 2006).

1.2. Constats sur le changement climatique à l'échelle de l'Afrique de l'ouest

1.2.1. Observations

Les températures en Afrique de l'Ouest, et particulièrement dans le Sahel, ont évolué 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 sahélo saharienne, sahélienne et soudanienne (CEDEAO-CSAO/OCDE/CILSS, 2008). La région Ouest africaine semble être la région du monde qui a connu le plus fort déficit de pluies depuis plus de 30 ans puisque la pluviosité annuelle aurait diminué de 40% entre 1968 et 1990. La situation semble ces dernières années revenir à la normale avec toutefois une survenance plus fréquente de phénomènes extrêmes : périodes sèches pendant la saison des pluies, inondations graves à certains moments, une partie due à l'aménagement. Aujourd'hui, les pluies s'arrêtent parfois inopinément durant plusieurs semaines, ou tombent brusquement en trombes ou se prolongent anormalement. La figure ci-dessous montre les trois principales périodes de la variabilité pluviométrique enregistrée dans la région avec une période humide de 1950-1969, une période sèche de 1970-1994 et enfin une alternance brusque entre année humide et année sèche à partir de 1995.



Source : Bulletin mensuel du CILSS, numéro spéciale, 2010

Figure 2: Indice de pluie (IPS) du Sahel sur la période allant de 1950 à 2006

1.2.2. Impacts

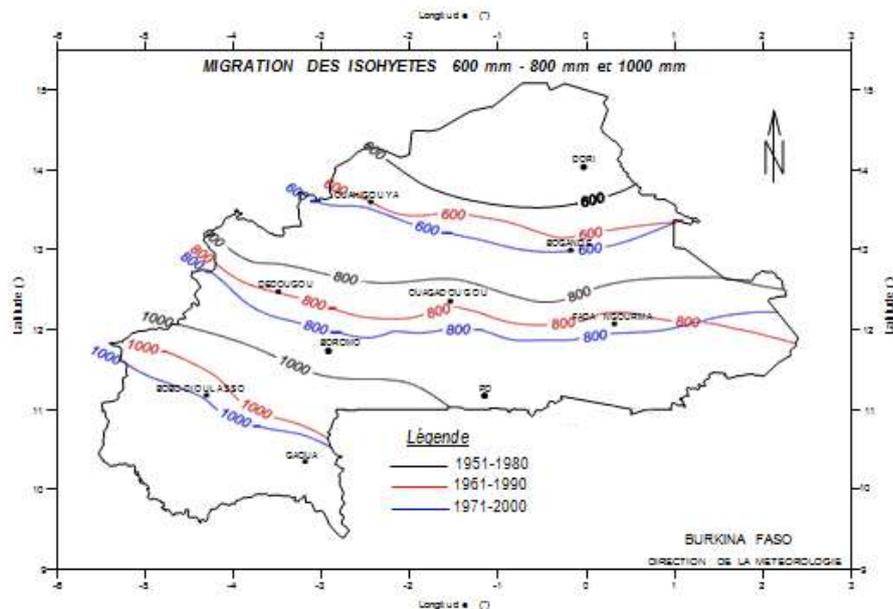
Le changement climatique est source de nombreux désastres en Afrique de l'ouest. Les formations naturelles ont subi de profondes modifications, dues essentiellement à l'aridité du climat et surtout aux activités humaines (l'Afrique se distingue par un taux de déboisement estimé à 0,78% par an alors qu'au niveau mondial, les pertes forestières sont de l'ordre 0,22% par an ; l'Afrique soudano sahélienne occidentale est la zone la plus touchée, avec des ressources forestières déjà fortement limitées). Les érosions, les sécheresses fréquentes, plus que tout autre facteur, ont contribué à fragiliser davantage les écosystèmes, les rendant plus vulnérables à la moindre perturbation et accélèrent le rythme de dégradation des ressources biologiques. La modification du système naturel des crues suite aux changements climatiques entre autres engendre une transformation importante dans les systèmes de production traditionnels basés sur les cultures de décrue et diminue également les zones de pâturages naturel entraînant ainsi des conflits fonciers entre agriculteurs et éleveurs. Ceci va compromettre la sécurité alimentaire et aggravera la malnutrition dans le continent¹.

1.3. Constats sur le changement climatique à l'échelle du Burkina Faso

1.3.1. Observations

Les températures au Burkina connaissent une forte variabilité spatio-temporelle. Les moyennes mensuelles dépassent rarement 35 °C et les extrêmes se rencontrent au nord avec une valeur minimale absolue de 5°C à Markoye en janvier 1975 et une valeur maximale absolue de 47,2 °C à Dori en 1984 (MECV /SP /CONNED, 2006). Dans l'ensemble, l'évolution temporelle des températures montre une tendance à la hausse dans les principaux domaines climatiques au Burkina. Les fluctuations pluviométriques observées dans la zone Afrique de l'Ouest sont aussi valables pour un pays comme le Burkina Faso qui est sous l'influence de la mousson Ouest africaine. Les précipitations ont connus une baisse sensible durant la période 1950 à 2000. Cette baisse s'est manifestée par le déplacement latitudinal des isohyètes moyennes vers le sud en l'espace de trois normales (période de 30 années consécutives) 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000 (MECV /SP /CONNED, 2006).

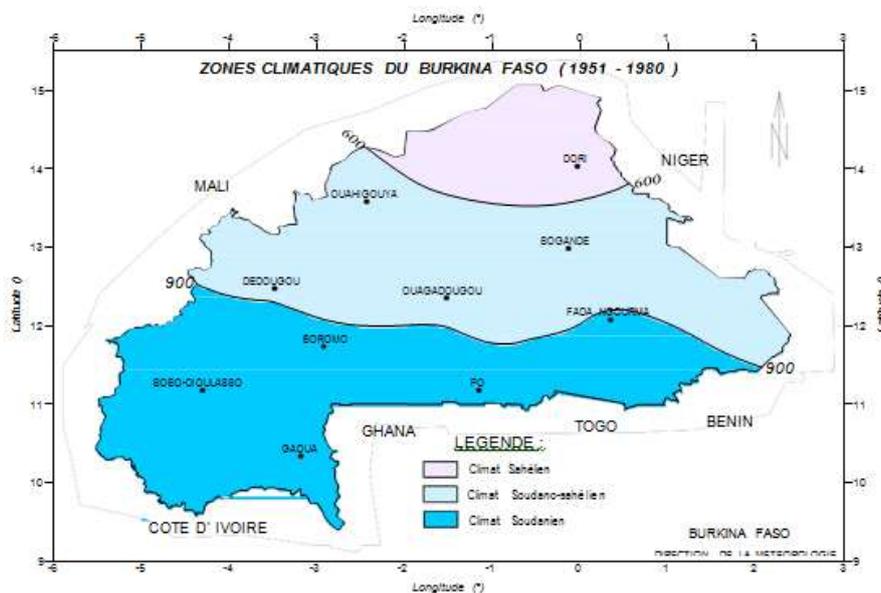
¹ www.performancesconsulting.com

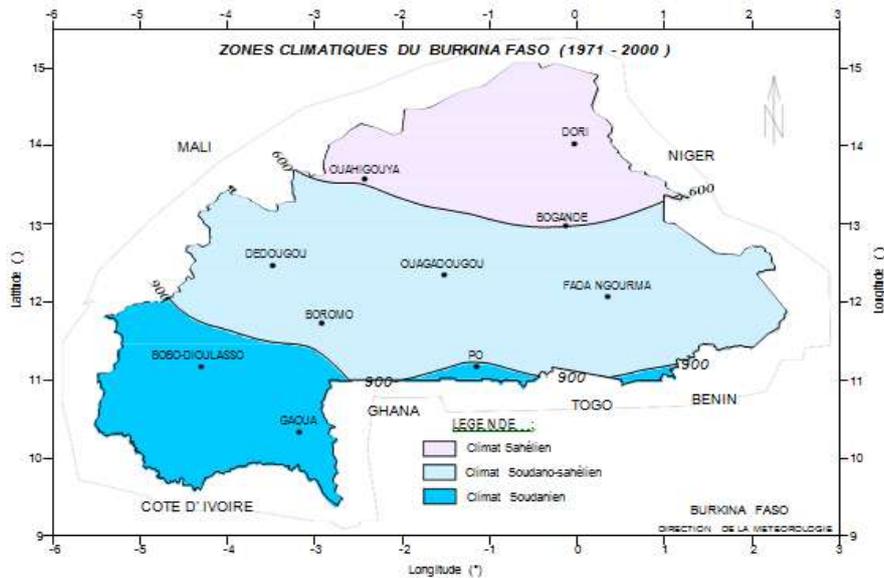


Source : MECV/SP/CONNED, 2006

Carte 1: Migration des isohyètes 600mm, 800mm, 1000mm de 1951 à 2000 au Burkina Faso

Ces migrations des isohyètes moyennes annuelles ont aussi eu pour conséquences des changements notables dans la délimitation des domaines climatiques du pays. En effet, la comparaison des deux cartes ci-dessous montre un rétrécissement très important du domaine soudanien entre les deux normales précitées. Le climat soudano-sahélien (pluviométrie annuelle < 900 mm) et le climat sahélien (pluviométrie < 600 mm) sont respectivement descendus d'environ 100 km vers le sud.





Source : MECV /SP /CONNED, 2006

Carte 2: Domaines climatiques du Burkina Faso 1951-1980 et 1971-2000

La variabilité pluviométrique au Burkina Faso au cours de ces dernières années a été très forte se traduisant par des débuts ou des fins de saison pluvieuse précoces en certains endroits et trop tardifs en d'autres, par des poches de sécheresses fréquentes en cours de saison. Cette situation a plutôt renforcé la pluviométrie de la moitié nord du pays tout en réduisant celle de la partie sud du pays sans toutefois bouleverser l'allure générale du gradient sud-nord de la répartition spatiale générale de la pluviométrie. Cette forte variabilité de la pluviométrie a nettement réduit en définitive la quantité globale de la pluviométrie annuelle tout en compliquant sa gestion pour les besoins de l'agriculture pluviale (SP/ CONNED, 2008).

Les prévisions climatiques reflètent une augmentation préoccupante des températures moyennes de 0,8°C à l'horizon 2025 et de 1,7°C à l'horizon 2050 ainsi qu'une diminution de la pluviométrie de 3,4% en 2025 et 7,3% en 2050 (MECV /SP /CONNED, 2006).

1.3.2. Impact

Au Burkina Faso, les sécheresses et les inondations sont devenues récurrentes. De grandes sécheresses ont été enregistrées dans les années 1970 et se sont poursuivies au cours des décennies postérieures (1983-1984, 2000-2001) et plusieurs inondations ont eu lieu ces dernières années : en août-septembre 2007, le pays a souffert d'inondations de grande

ampleur et de nouveau en 2009, un total de 22 200 hectares ont été inondés en septembre. Ces pluies ont causé d'importants dommages dans plusieurs régions du pays et spécialement dans la capitale Ouagadougou, où 150 000 personnes ont perdu leurs logements ou leurs animaux (MECV /SP /CONNED, 2006).

1.3.3. Vulnérabilité et capacité d'adaptation de la population du Burkina Faso et en particulier de la région du Centre Nord

Le Burkina Faso, à l'instar des autres pays de l'Afrique subsaharienne, est très vulnérable à la variabilité et au changement climatique. Cette vulnérabilité est due à un faible niveau de développement, aux institutions encore faibles, aux ressources naturelles fortement dégradées et à une très grande dépendance de l'économie nationale envers ces ressources. (Romero *et al.*, 2011) Le niveau de pauvreté est élevé au Burkina Faso, environ 46 % de la population vivant en dessous du seuil de pauvreté et 20 % du seuil de pauvreté extrême. En effet, l'économie de cette région du monde étant lourdement tributaire des secteurs sensibles au climat (agriculture, pastoralisme, pêche et sylviculture). Les changements climatiques sont donc considérés comme une des menaces les plus graves posées au développement durable, avec des effets défavorables attendus sur : la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources en eau, les autres ressources naturelles, et les infrastructures.

En réponse au changement climatique, les paysans ont adopté des stratégies d'adaptation dont les plus répandues sont : l'adaptation variétale, l'utilisation des techniques de conservation des eaux et des sols et l'utilisation de la fumure organique, la modification des dates de semis. Ces réponses varient selon les zones agro-climatiques du pays (Ouédraogo *et al.*, 2010).

2. Problématique et hypothèses

Les pays d'Afrique de l'Ouest et du Sahel, subissent après les sécheresses des années 1970 et 1980, les effets de fortes pluies et des inondations dévastatrices. Le Burkina Faso n'est pas épargné par cette variabilité pluviométrique qui n'est pas sans conséquence sur le domaine agronomique et environnemental. Malheureusement, aucun des études concernant le changement climatique n'abordent l'aspect régional, surtout dans les régions où les activités de survie sont rattachées à la pluviométrie.

Ainsi, les questions suivantes méritent d'être posées : comment évolue la situation climatique dans le Centre Nord du Burkina Faso suite au phénomène du changement

climatique et quels sont les changements spatiaux temporels affectant le régime pluviométrique au Burkina Faso?

Considérant la question de recherche assignée, les hypothèses avancées suivantes sont à vérifier:

Hypothèse 1 : Il existe une variabilité interannuelle de la pluviométrie dans la région, se traduisant par les variations des débuts et des fins de saison pluvieuse, ainsi que de la quantité globale de pluie annuelle dans la région qui tendent vers une régression. Cette hypothèse émane du constat du phénomène de changement climatique contemporain résultant des activités socioéconomique de la population locale favorisant l'augmentation des gaz à effet de serre.

Hypothèse 2 : Le régime de précipitation se répartit de façon irrégulière, vue l'influence des deux zones climatiques qui cohabitent la région et de la variabilité de la mousson Ouest Africaine.

Hypothèse 3 : La variabilité spatio-temporelle dans la région deviendra de plus en plus forte dans les dix (10) années à venir et le déficit pluviométrique sera très marqué, suite au phénomène de réchauffement climatique dont la région ne sera pas épargnée.

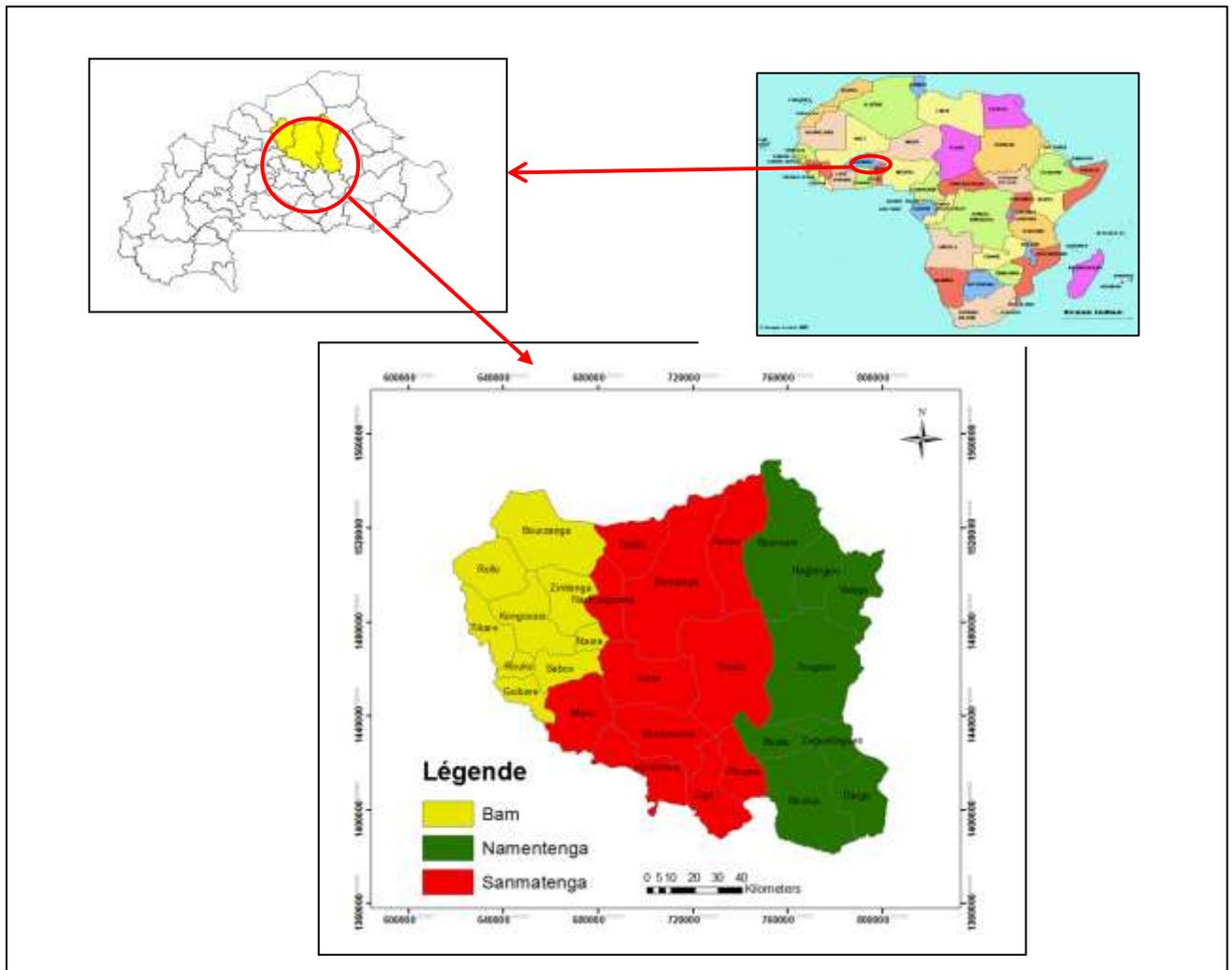
3. Description de la zone d'étude et son intérêt

En raison de la difficulté d'acquisition des données, l'étude ne peut pas se faire sur la totalité des pays. D'où le choix d'une seule région qui est le Centre Nord, tout d'abord à cause de son milieu naturel contraignant et fortement tributaire de l'eau notamment pour les activités agro-pastorales (Conseil Régional pour le développement du Burkina Faso, 2010). Or, il est à noter une diminution significative de la pluviométrie dans les régions du Centre et du Plateau central. Ces diminutions touchent d'ailleurs l'ensemble des régions du Burkina Faso, particulièrement les zones sahéliennes et soudano sahéliennes. La diminution de la pluviosité est aussi accompagnée par une prolongation de la saison sèche et un raccourcissement de la durée de la saison des pluies. Les saisons sont également quelque peu décalées dans le temps (<http://www.mediaterre.org> : climat et changement dans l'environnement de Burkina Faso, 2012). Par conséquent, il est primordial d'analyser la dynamique pluviale de cette région qui est particulièrement touché par la désertification.

3.1. Le milieu physique

3.1.1. Situation géographique

La région du Centre-Nord est située dans la zone centrale du Burkina Faso avec une superficie de 19 160 km² (DGAT-DL, 2010), soit 7% de la superficie du territoire national. Située entre les parallèles 12°40' N et 14° N, elle est limitée au nord par la région du Sahel, au sud par les régions du Plateau Central et du Centre-Est, à l'est par la région de l'Est et à l'ouest par la région du Nord. La région du Centre-Nord est subdivisée en 3 provinces, 28 départements, 3 communes urbaines, 25 communes rurales et 820 villages. Les provinces de la région et leurs chefs-lieux cités entre parenthèses sont les suivants : Bam (Kongoussi) de 3931 km², Namentenga (Boulsa) 6158 km² et Sanmatenga (Kaya) de 9419 km². Le chef-lieu de la région est Kaya(MAH, 2011).



Carte 3: Localisation de la région du Centre Nord au Burkina Faso

3.1.2. Climat

Deux climats cohabitent dans le Centre-Nord. Dans la partie sud de la région, on trouve la zone climatique sahélo soudanienne où les précipitations annuelles varient entre 750 et 600 mm. Dans la partie nord, on rencontre un climat sahélien où il ne tombe guère plus de 600 mm de précipitations annuelles. La saison des pluies dure moins de quatre mois et l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est importante. La température moyenne se situe entre 17,7 °C à 40°C. Les quantités d'eau tombées varient d'une année à une autre, on constate également une baisse de la pluviométrie depuis les sécheresses des années 1970 (MAH, 2011).

3.2. *Le milieu naturel*

3.2.1. Végétation

Conditionnée par le climat, la végétation est de type soudano sahélien, constituée de savane arborée dans le sud et de savane à hautes herbes au nord tendant à remplacer les steppes d'épineux. Il y a 4 forêts classées, des forêts reliques et des forêts départementales (MAH, 2011). Il y existe une forte diversité biologique et plus d'une soixantaine d'espèces fournissent des produits forestiers non ligneux (PFNL) comme *Acacia Senegal* (gomme arabique en peuplement naturel ou en plantation), *Vitellariaparadoxa*, (karité), *Tamarindus indica* (tamarinier), *Bombax costatum* (kapokier rouge), *Adansoniadigitata* (baobab), *Acacia microstatachya*, etc.

3.2.2. Relief et sol

Le relief de la région du Centre-Nord est constitué d'une vaste pénéplaine monotone peu accidentée correspondant au bassin versant du Niger (Barsalogo, Boulsa, Tougouri). Cette pénéplaine est contrastée par endroit par quelques vallées et des formations collinaires que sont : les vallées du Nakanbé au Centre Sud, de la Sirba à l'Est et des collines birrimiennes à l'Ouest dans le Bam. L'altitude moyenne est de 350 à 400 m (MAH, 2011).

Les sols les plus répandus dans la région sont des sols peu évolués, développés sur du matériau gravillonnaire, couvrant environ 60% de la superficie régionale. La région du Centre Nord compte 6 principaux types de sols : les lithosols sur cuirasse, les sols bruns eutrophes sur roches basiques, les sols ferrugineux tropicaux lessivés, les sols hydromorphes, les sols peu évolués d'érosion gravillonnaires, les sols sodiques hydromorphes.

3.2.3. Ressource en eau

Le réseau hydrographique de la région s'organise autour de deux bassins versants principaux : celui du Nakanbé et le sous-bassin du Niger qui collectent les principales eaux de la région et les drainent vers les principaux cours d'eau. Le Nakanbé est le plus important et ne cesse de s'écouler qu'une partie de l'année. La région abrite 98 plans ou retenues d'eau.

Du point de vue des potentialités des ressources en eaux souterraines, la région du Centre Nord est l'une des plus défavorisées. Les unités hydrogéologiques les plus favorables occupent seulement 3% de la région. Les ressources en eau utilisées pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) sont principalement de l'eau souterraine utilisée pour les centres ONEA (Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement) de Boulsa, Kaya et Kongoussi. (MAH, 2011)

3.3. *Le milieu humain*

3.3.1. Population

Lors du dernier recensement général de la population et de l'habitation (MEF, 2006), la région avait une population de 1 202 025 habitants, soit 8,6% de la population du pays. La population féminine est majoritaire dans la région avec une proportion de 53%. La moitié de la population de la région réside dans le Sanmatenga et l'autre moitié se répartit à peu près équitablement entre les 2 autres provinces. Le taux d'urbanisation n'est que de 8,1%, largement inférieur à celui de l'ensemble du pays qui est de 22,7%.

La région a réalisé un taux d'accroissement de la population de 2,6 % entre 1996 et 2006, inférieur au taux national qui est de 3,1%.

Au niveau ethnique, la région du Centre-Nord est habitée principalement par les Mossi qui sont largement majoritaires et les Peulh. Les autres communautés ethniques sont faiblement représentées (MAH, 2011).

3.3.2. Activités socioéconomiques

L'économie de la région repose sur des activités agro-pastorales, l'artisanat et l'exploitation forestière. Les activités agricoles en particulier souffrent cependant de conditions pédoclimatiques peu favorables. Les industries sont inexistantes dans la région même si on note l'existence de quelques unités de collecte et de transformation du lait de vache. Des activités d'exploitation minières se sont développées dont la plus importante est la

mine d'or de Taparko. La région se caractérise par l'existence de ressources minérales telles que l'or, le diamant et le fer (MAH, 2011).

4. Matériels et méthodes

4.1. Revue sur les méthodes d'analyse de l'évolution de la pluviométrie

4.1.1. Étude de la variabilité pluviométrique

a. Indices pluviométriques

L'indice pluviométrique est utilisé pour visualiser l'alternance des périodes sèches et humides dans un contexte régional à l'aide d'une représentation cartographique (Paturel et al., 1998). L'étude des indices pluviométriques joue un rôle très important dans la détermination des variations saisonnières. C'est une variable centrée et réduite. Cette méthode permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométriques d'une région (Drissa et al., 2011). Cet indice sera plus amplement détaillé dans la partie méthodologie du travail.

b. L'indice de sécheresse (IS)

C'est l'indice de l'écart pluviométrique. Il permet d'estimer le déficit pluviométrique annuel. Cet écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitations d'une année P_i et la hauteur moyenne annuelle de précipitations P de la série. La formule est : $IS = P_i - P$; l'indice est positif pour les années humides et négatif pour les années sèches. (Doukpolo, 2007)

c. L'indice de pluviosité (IP)

C'est le rapport de la hauteur de précipitations d'une année P_i à la moyenne annuelle des pluies P de la série. La formule est : $IP = \frac{P_i}{P}$; une année est dite humide si ce rapport est supérieur à 1 et sèche s'il est inférieur à 1. (Doukpolo, 2007)

4.1.2. La recherche de tendance et détection de rupture

a. Test de Pettitt

Ce test est utilisé sur tous les postes pluviométriques retenus en vue d'identifier une "rupture" en moyenne dans les séries chronologiques de pluviométrie annuelle étudiées, après

que l'absence d'autocorrélation au sein de ces séries ait été vérifiée. L'absence d'une rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (Paturel *et al.*, 1998 ; Cuccia, 2008...)

b. Procédure de segmentation

La méthode de segmentation proposée par Hubert (1998), est très utilisée dans l'étude de la variabilité climatique pour sa performance et sa robustesse. Elle a été appliquée pour l'identification des ruptures au sein des séries chronologiques de fréquence de pluie (Patutel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1998). Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique (Kouassi *et al.*, 2010). La méthode est considérée comme un test de stationnarité ; « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Cependant, il est difficile d'attribuer un niveau de signification à ce test (Hubert *et al.*, 1998).

c. Test de Mann-Kendall

Ce test non paramétrique de Mann-Kendall sert à déterminer si une tendance est identifiable dans une série temporelle qui comprend éventuellement une composante saisonnière (Doukpolo, 2007). Ce test de tendance résulte d'une amélioration du test d'abord proposé par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) de façon à prendre en compte une composante saisonnière. L'hypothèse nulle H_0 de ce test est l'absence de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies. Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du tau (τ) de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons.

4.1.3. La détermination de la saison des pluies : début, fin et longueur.

Il existe plusieurs définitions relatives à la longueur de la saison des pluies seulement trois seront définis ici.

La première méthode (Stern *et al.*, 1981) définit le début de la saison des pluies lorsque 20 mm de pluie sont recueillis en deux jours consécutifs sans période sèche supérieure à dix jours dans les trente jours qui suivent, et la fin lorsqu'il n'y a plus de pluie durant une période de quinze jours.

La deuxième a été élaborée à partir d'observations effectuées sur le mil au Centre Sahélien de l'ICRISAT pour une série de stations sahéniennes et soudanaises (Sivakumar, 1987). Elle a ensuite été appliquée à tout le réseau de stations pluviométriques au Sénégal,

Niger, Mali, Burkina Faso. Pour cette méthode, le critère retenu pour déterminer la date du début de la saison des pluies est de 20 mm de pluie recueillis en trois jours consécutifs après le 1er mai, sans période sèche supérieure à sept jours dans les trente jours qui suivent. La fin de la saison des pluies est fixée au jour où, après le premier septembre, il n'y a plus de pluie durant une période de vingt jours.

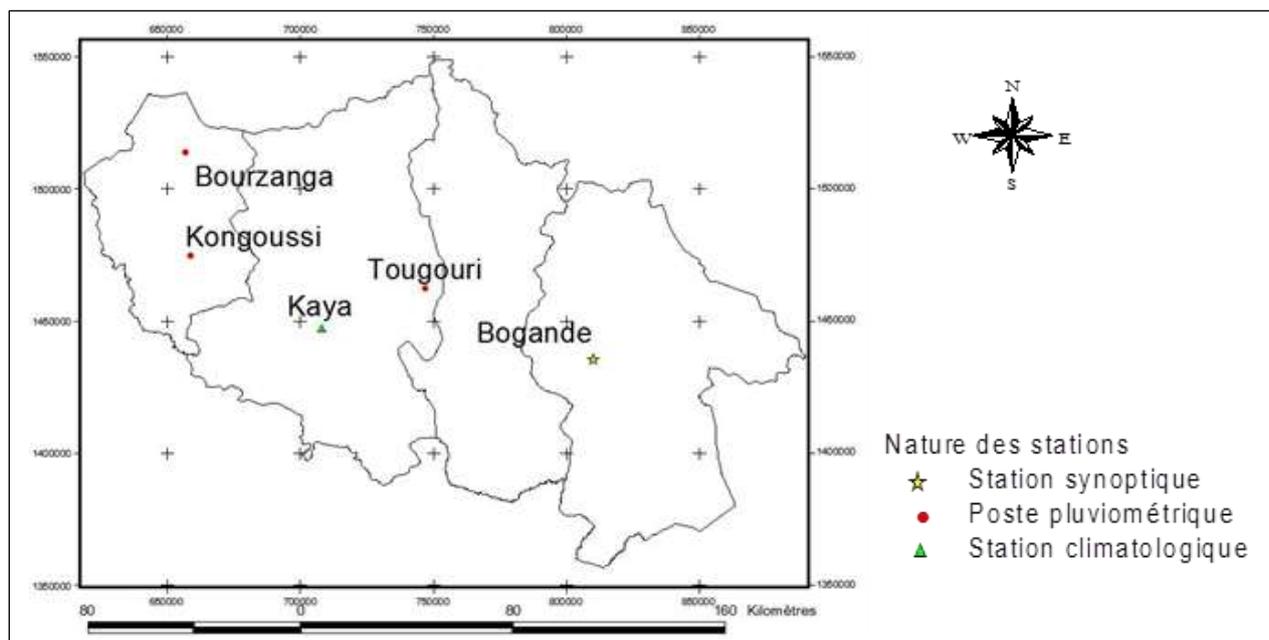
La troisième a été développée au Sénégal avant d'être appliquée au Niger (Ozer, 1993 ; Ozer & Erpicum, 1995 ; Erpicum *et al.*, 1988) ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade » (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade ». Au moment où la saison des pluies est installée, ces écarts sont fortement prononcés.

4.2. Les données et outils

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont la pluviométrie, la température de l'air et l'humidité relative de l'air. Elles sont collectées auprès de la direction générale de la météorologie d'Ouagadougou. Les pluies journalières des stations de Bourzanga, Kongoussi, Kaya, Tougouri, et Bogande² ont été utilisées. Elles couvrent la période 1972-2012. En ce qui concerne les températures et les humidités relatives de l'air, elles ont été prises dans la station synoptique de Bogande et couvrent respectivement la période 1980 à 2011 et 1998 à 2011.

Les logiciels utilisés dans ce travail seront les logiciels de traitement statistique R et Xlstat ainsi que le logiciel cartographique Arcgis .

² Bogande : cette station a été choisie car c'est la seule station synoptique proche de la région où les données de température et d'humidité relative ont été obtenues.



Source : Auteur, 2013

Carte 4: Stations pluviométriques retenues

Tableau 1: Caractéristiques des stations météorologiques retenues

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Date d'ouverture
Kongoussi ³	13°20N	1°32W	-	-
Bourzanga	13°41N	01° 33W	329	1963
Kaya	13°06N	01°05W	313	1919
Tougouri	13°19N	03°00W	280	1953
Bogande	12°59N	00°08W	250	1948

Source : DGM, 2013

4.3.Approches méthodologiques

4.3.1. Choix des variables météorologiques

La question la plus importante, tant pour l'Afrique de l'Ouest que dans les autres régions du monde, en terme de la variabilité climatique à part son caractère est la recherche de facteurs explicatifs. Ainsi au cours de cette étude, les paramètres climatiques tels que la température de l'air et l'humidité relative de l'air seront analysés afin de mettre en exergue leur influence sur la variabilité du régime des précipitations. De plus, la plupart des études climatiques réalisées se sont limitées à l'analyse des données pluviométriques annuelles ou mensuelles. Aussi, des variables afférentes aux pluies telles que les fréquences de jours de

³ Pour cette station les coordonnées géographiques manquantes ont été remplacées par ceux de Google Earth

pluies et les durées des saisons pluvieuses, seront abordés dans cette étude pour mieux mettre en évidence la variation des régimes pluviométriques.

4.3.2. Méthode

L'étude de l'évolution des précipitations ne peut utiliser les données hétérogènes. Plusieurs méthodes statistiques permettent de tester l'homogénéité des séries pluviométriques avant utilisation. Parmi elles, il a été retenu le test graphique des doubles cumuls ou de cumul simple des totaux pluviométriques annuels pour sa pertinence et sa simplicité (Escourou, 1978). Il s'agit de savoir si les données d'observation sont fiables, donc utilisables telles quelles. L'analyse des représentations graphiques révèle que les données sont continues et homogènes. Aucune rupture significative n'apparaît sur la droite des totaux annuels cumulés sur chacune des stations au cours des 40 années d'observation.

L'analyse de l'évolution du régime pluviométrique a été effectuée sur la base des données existantes dont les indicateurs sont : la température de l'air et l'humidité relative de l'air et aussi la pluviométrie journalière et annuelle. L'évolution depuis les trente dernières années et surtout sa tendance pour l'avenir ont été établies.

Pour cela le travail s'est articulé autour des axes suivants, basé sur les observations et les analyses :

a. Analyse de la variabilité du régime pluviométrique et les facteurs influençant

▪ **Analyse des jours pluvieux**

La typologie des précipitations journalières proposée dans le cadre de ce mémoire est liée aux normes internationales de seuil définies par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 1990). Les différentes classes sont définies en fonction du nombre de jours de pluie de hauteur comprise entre :

- 1 et 10 mm (P_1) ;
- 10 et 30 mm (P_2) ;
- 30 et 50 mm (P_3) ;
- >50 mm (P_4).

- **Mise en évidence de tendance et de rupture**

§ Le test de Mann (1945) et de Kendall (1975) permet de déceler l'existence d'une unique tendance globale au sein d'une série. Le test de Mann-Kendall qui est basé sur la statistique de corrélation de rang t de Kendall est utilisé pour vérifier si une série a un caractère aléatoire (hypothèse nulle) ou sinon une tendance particulière (hypothèse alternative)

§ Le test de Pettitt (1979) a été appliqué à la série dans l'optique de détecter une rupture éventuelle. Lorsque l'hypothèse nulle (H_0) est acceptée, il est déduit l'inexistence de rupture dans la série (X_i) de taille N . Si l'hypothèse est rejetée, la date de rupture est estimée en considérant le maximum de valeur absolue observée dans la série.

Une courbe de corrélation sera effectuée entre le nombre de jour de pluie et la pluie moyenne annuelle pour voir si les deux variables sont liés ou pas.

- **Analyse de la longueur des saisons pluvieuses**

La détermination du début et de la fin de la saison des pluies est basée sur la méthode élaborée par Ozer et Erpicum (1995). Ces auteurs ont établi, selon des critères climatiques, que la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade [6] » déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode sec de plus de sept jours. Les jours de pluie (précipitations ≥ 1 mm), tout comme les jours secs (précipitations < 1 mm), sont comptés par « pentade » du 1er mars au 31 octobre. La période retenue englobe la saison pluvieuse. Des pourcentages de jours pluvieux et jours secs ont été calculés par pentade. Un graphe établi sur la période retenue met dans un même référentiel la courbe traduisant les pourcentages de jours pluvieux et celle des pourcentages de jours secs. Le recoupement des deux courbes permet de définir les différentes périodes pluvieuses ou sèches. La période pluvieuse se définit par la position de la courbe des jours pluvieux au-dessus de la courbe des jours secs. La période sèche se définit par la position de la courbe des jours secs au-dessus de la courbe des jours pluvieux.

- **Analyse de la température et l'humidité relative de l'air**

La température de l'air et l'humidité relative de l'air sont analysées à partir de statistique descriptive (valeurs moyennes, variance et écart-type) et de représentations graphiques, afin de visualiser leur variabilité dans le temps.

▪ **Méthode de l'analyse en composantes principales (ACP)**

Cette méthodologie poursuit comme objectif la détermination des facteurs météorologiques qui influencent la variabilité temporelle des variables des précipitations ; la méthode d'ACP utilisée pour cette étude est basée sur l'interprétation de la matrice de corrélation de même que les différents facteurs obtenus à la suite du traitement des données. En effet, deux variables sont corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,7. De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs.

La méthode d'analyse en composantes principales normées (ACP_N) est appliquée à 14 variables qui sont :

- Les variables liées à la pluie : la pluie moyenne mensuelle (P_{mens}), le nombre moyen mensuel total de jours de pluie (P) et les différentes classes définies en fonction du nombre de jours de pluie de hauteur définies, P_1 (1 à 10 mm), P_2 (10 à 30 mm), P_3 (30 à 50 mm) et P_4 (>50 mm),
- Les variables liés aux conditions atmosphériques : la température moyenne mensuelle (T_{moy}), la température mensuelle maximale annuelle (T_{max}), la température mensuelle minimale annuelle (T_{min}), l'amplitude thermique ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$) (AT), l'humidité relative moyenne mensuelle (HR_{moy}), l'humidité relative mensuelle maximale annuelle (HR_{max}), l'humidité relative mensuelle minimale annuelle (HR_{min}), l'amplitude de l'humidité relative ($HR_{\text{max}} - HR_{\text{min}}$) (AHR)

Ces variables de nature saisonnière ont été choisis, étant donné que la variabilité temporelle des pluies se manifeste surtout sur les fréquences de pluies.

b. Analyse de la répartition spatiale de la pluviométrie dans la région

▪ **Cartographie des indices pluviométriques**

Cette méthode a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires. Ainsi, pour chacun des postes pluviométriques retenus, un indice de la pluie interannuel a été déterminé. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation (Servat *et al.*, 1998):

$$I_i = \frac{\chi_i - \chi_m}{\sigma}$$

I_i : Indice pluviométrique

χ_i : Hauteur de pluie de l'année i (en mm),

χ_m : Hauteur de pluie moyenne sur la période d'étude (en mm),

σ : Écart type de la hauteur de pluie sur la période d'étude.

L'indice pluviométrique qui a été utilisé ici est une moyenne par décennie des indices annuels calculés. La cartographie a été effectuée à l'aide d'une méthode d'interpolation spatiale basée sur la méthode de « l'inverse distance pondérée » (IDW). Ainsi, une zone recevra une quantité de pluie normale si son indice est compris entre -0,1 et +0,1. Elle sera dite humide si son indice est supérieur à 0,1 et sèche en deçà de -0,1 (Lawin *et al.*, 2011).

▪ **Cartographie des pluies moyennes annuelles brutes pour chaque décennie**

Pour chacune des décennies de la série 1972-2012, à chaque fois à partir des mêmes postes, sur la zone étudiée, la cartographie de tracé des isohyètes interannuelles a été effectuée pour représenter la fluctuation de la pluviométrie après avoir effectué également une interpolation des pluies moyennes annuelles.

c. Profil à l'horizon 2025

La modélisation pour les séries temporelles [7] est utilisée ici pour projeter les variables d'intérêt (liées à la pluie) notamment les indices pluviométriques à l'horizon 2025. Pour cela, la procédure ARIMA a été choisie. Le modèle des séries chronologiques univarié ARIMA permettent de projeter un phénomène en se basant sur son évolution passée. La procédure ARIMA d'ordre (p, d, q) est en fait un modèle autorégressif à moyenne mobile intégrée où p exprime le nombre de termes autorégressifs, d représente le nombre de différences et q désigne le nombre de moyenne mobiles dans ce modèle.

La démarche suivante a été adoptée⁴ :

– représenter graphiquement la série afin de repérer les tendances et saisonnalités c'est-à-dire la non stationnarité,

⁴ www.loria.fr/_sur/enseignement/modprev/

- supprimer les tendances et saisonnalités pour éviter de biaiser les résultats de prévision par la méthode de différence (il sera défini à partir d'une série une nouvelle série qui à t, fait correspondre la différence entre la valeur de la série observé à l'instant t et celle observée à l'instant t-1,
- choisir un modèle parmi les modèles ARIMA d'ordre (p, d, q) dont le critère AIC (Akaike Information Criterion ou critère d'information) possède la plus petite valeur et, valider par la méthode ACF (fonction d'autocorrélation) c'est à dire le modèle susceptible de reproduire la série est celui qui ne présente pas une autocorrélation significative,
- prédire les réalisations futures à l'aide de ce modèle choisi.

Après avoir obtenu les résultats de prévisions des indices pluviométriques pour chaque station, les moyennes des indices pluviométriques de toutes les stations pour les années prédites sont représentés graphiquement et cartographier pour analyser le profil du régime pluviométriques futurs. Notons que tous les traitements de prédiction ont été générés par le logiciel R. En effet en pratique, et dans le logiciel R notamment, c'est un processus qui est directement utilisés ; ce qui a influencé le choix de ce modèle vue que la modélisation climatique requiert non seulement du temps mais aussi des moyens.

Il a été aussi utilisé les données obtenues à partir des simulations climatiques notamment le modèle climatique [8] régional RACMO⁵ tourné sous le scénario A1B [9] du GIEC pour pouvoir vérifier les résultats obtenues auparavant d'une part et de comparer d'autre part . Ce modèle a été mis en œuvre par le groupe ENSEMBLE⁶ sur la zone ouest africaine (de -35° à +31° en longitude et de -20° à +35° en latitude) dans le cadre du programme AMMA, avec une résolution spatiale de 0.44°x0.44° (50x50 km²). Les données utilisées correspondent aux données des mailles dont la distance par rapport aux coordonnées des stations est minimale. Cette distance minimale est calculée par la formule :

$$d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \text{ avec}$$

x=latitude de la maille

x₀= latitude de la station considérée

y=longitude de la maille

y₀=longitude de la station considérée

⁵ a.knmi2.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR302.pdf

⁶ <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>

Ensuite l'indice pluviométrique sera calculé par la formule : $\frac{\chi_i - \chi_m}{\sigma}$

Avec :

χ_i : Hauteur de pluie simulé de l'année i (en mm),

χ_m : Hauteur de pluie moyenne sur la période de référence (en mm),

σ : Écart type de la hauteur de pluie sur la période de référence

Il faut noter que les données pluviométriques simulés sur le Burkina Faso ont été déjà corrigés et validés (Ibrahim, 2012). De plus le laboratoire analyse mathématique des équations de l'Université de Ouagadougou a aussi effectué une évaluation de l'adéquation pour le Burkina Faso des divers modèles climatiques régionaux produit par ENSEMBLE dont RACMO.

4.3.3. Limites

Il est à remarquer que l'accomplissement de ce travail a été confronté à des obstacles à savoir : l'existence des lacunes dans les séries de données surtout pour les températures. Ces lacunes ont été comblées par la valeur moyenne de la série d'étude. Il y a eu également l'insuffisance de données concernant la station synoptique de la région. D'où l'utilisation de la station synoptique la plus proche. Par ailleurs, le non accès aux données de tout le pays et faute de temps nous oblige à choisir une seule région qui est le Centre Nord

4.4. Cadre opératoire

Tableau 2: Cadre opératoire

Problématique	Hypothèses	Indicateurs	Méthodes	Activités
Comment évolue la situation climatique et quels sont les changements affectant le régime pluviométrique dans le Centre Nord ?	H1 : Il existe une variabilité temporelle de la pluviométrie dans la région	I1 : Variation du début et fin de la saison de pluie I2 : Diminution de la fréquence des jours de pluies	Représentation graphique Analyse statistique	Analyse décennale de la courbe de l'évolution des pourcentages des jours secs et jours pluvieux en fonction des pentades Analyse des pourcentages des jours pluvieux Test de tendance et de rupture
	H2 : Le régime de précipitation se répartit d'une façon irrégulière	I1 : Répartition des indices pluviométriques dans la région I2 : Tracé des isohyètes interannuelles	Cartographie	Analyse décennale de la répartition des indices pluviométriques et des pluies annuelles
	H3 : la variabilité spatio-temporelle deviendra de plus en plus forte dans les dix (10) années à venir	I1 : évolution interannuelle des indices pluviométriques futurs I2 : Répartition des indices pluviométriques futurs	Modélisation et utilisation de données pluviométriques simulées Cartographie	Comparaison des tendances spatio-temporelles des indices pluviométriques passés et futurs

Source : Auteur ,2013

CHAPITRE II : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1. Analyse de la variabilité temporelle du régime pluviométrique et les facteurs influençant

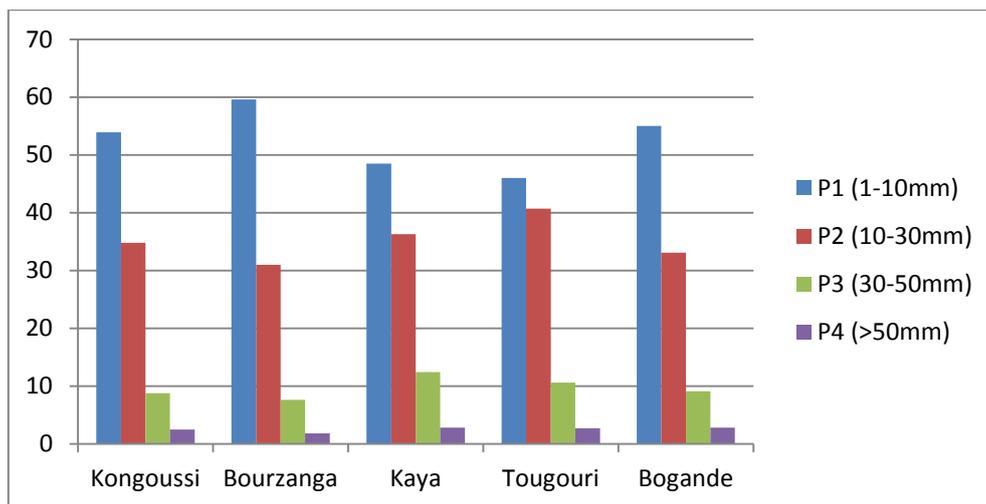
Cette partie est basée sur la variation temporelle du régime pluviométrique de la région du Centre Nord, sa tendance et les périodes de rupture. Toutes ces caractéristiques sont mises en évidence par l'analyse statistique des précipitations mensuelles mais aussi annuelles. Par la suite, l'influence des variables liés à l'atmosphère tels que l'humidité relative et la température de l'air sur le régime pluviométrique sera démontrée.

1.1. Variabilité des nombres de jour de pluie, du cumul annuel, du début et de la fin de la saison des pluies

1.1.1. Analyse des jours pluvieux

Les P_1 et P_2 sont les classes de pluie qui constitue l'essentiel de la pluviométrie au niveau de la région ($P_1 > P_2 > P_3 > P_4$).

Ce résultat permet de conclure que le nombre moyen de jours de forte intensité de pluie est faible dans la région. Cela signifie que les risques de dégâts provoqués pendant la saison de pluie dans la région sont minimales au contraire la sécheresse sévit déjà dans la région.



Source : Auteur, 2013

Figure 3: Pourcentage pluviométrique des classes de pluies par rapport au nombre annuel de pluie pour la période 1972-2012

1.1.2. Mise en évidence des tendances et ruptures

a. Test de Mann-Kendall

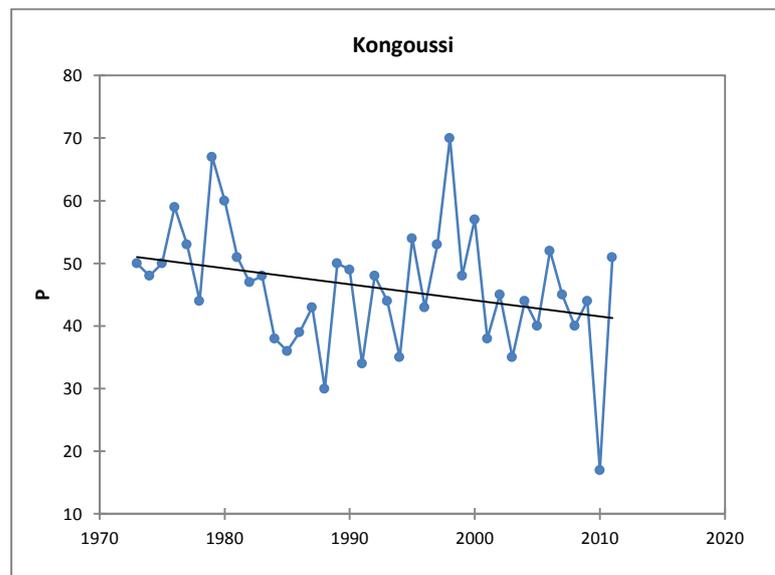
- Nombre de jour de pluie

Tableau 3: Résultats du test de Mann-Kendall sur le période de 1972-2012 pour le nombre de jour de pluie (P)

Station	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
p-value (pour alpha = 0,05)	0,041	0,001	0,031	0,001	0,0002* ⁷

Source : Auteur, 2013(BD : DGM)

Ce test confirme que par rapport au nombre annuel de pluie le régime pluviométrique de la région pour la série considérée n'est pas homogène ($p\text{-value} < \alpha$), qu'il est variable et présente une tendance générale à la baisse (cf. Fig N° 3 à 7) sauf pour la station de Bogande qui est à la hausse. Cela est peut-être dû à sa localisation qui fait partie de la région de l'Est.



Source : Auteur, 2013

Figure 4: Courbe de tendance des nombres de jours de pluies à Kongoussi

⁷ * : valeur significative

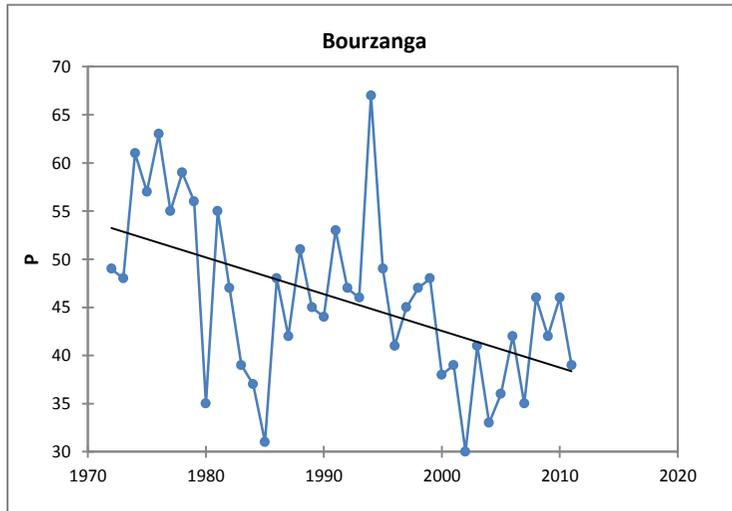


Figure 5: Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Bourzanga

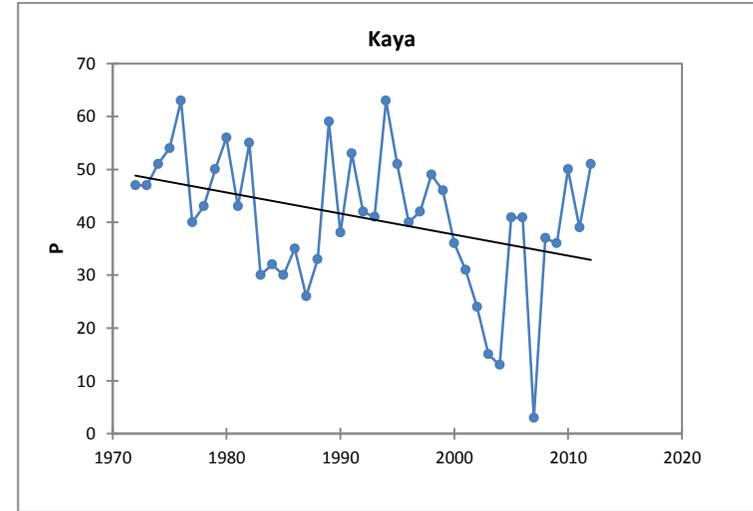


Figure 6: Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Kaya

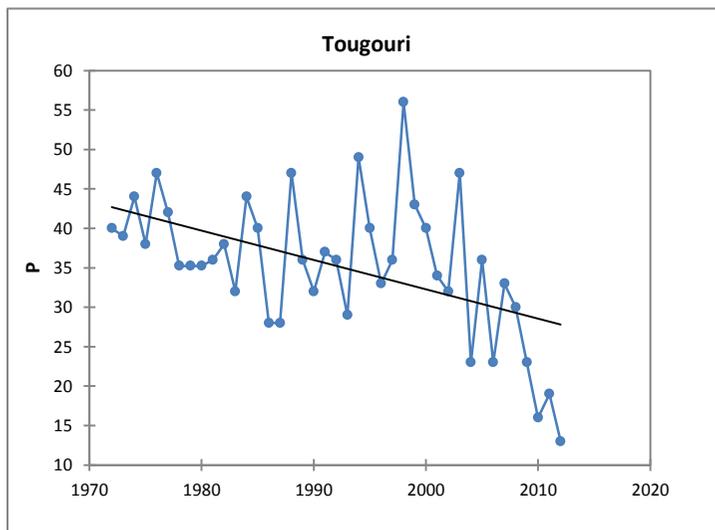


Figure 7: Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Tougouri

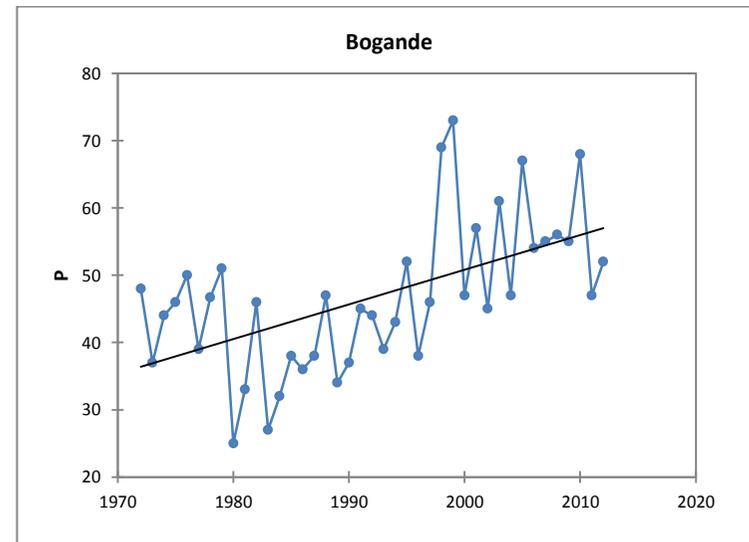


Figure 8: Courbes de tendance des nombres de jours de pluies à Bogande

- Cumul annuel de pluie

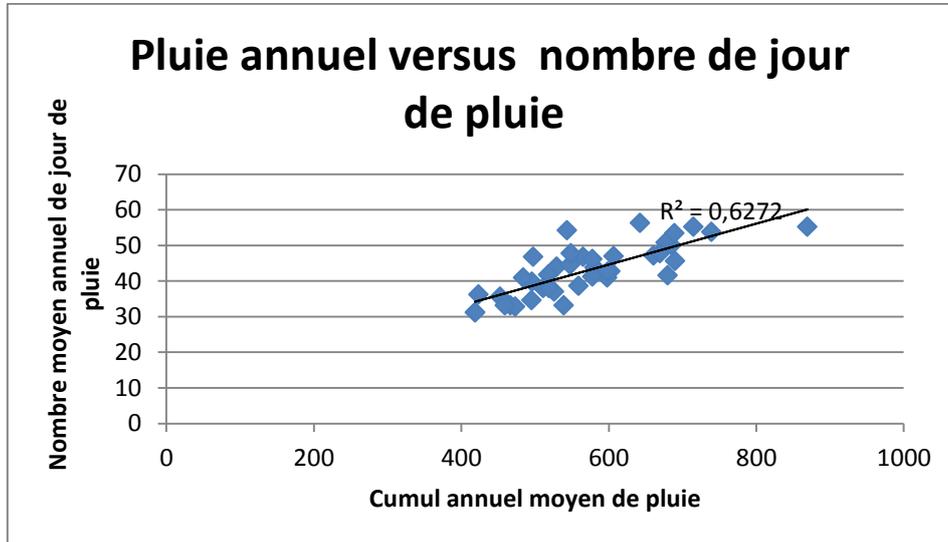
Cependant pour les cumuls annuels de pluies, les résultats du test de Mann-Kendall pour toutes les stations ne présente pas de tendance significative, toutes les p-value calculées sont supérieures au seuil alpha.

Tableau 4: Résultats du test de Mann-Kendall sur le période de 1972-2012 pour les cumuls annuels de pluies

Station	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
p-value (pour alpha = 0,05)	0,494*	0,387	0,312	0,150	0,214

Source : Auteur, 2013

Le résultat issu de la courbe de corrélation du nombre de jour de pluie et des pluies annuels donne un coefficient de 0,6 donc les deux variables sont quasiment liés (cf. Fig N° 8). Par conséquent l'inexistence de tendance significative dans le cumul annuel peut s'expliquer par une faible variation des pluies à forte intensités, malgré la diminution de la fréquence de pluie.



Source : Auteur, 2013

Figure 9: Courbe de corrélation entre le nombre moyen de jour de pluie et le cumul annuel moyen de pluie

b. *Test de Pettitt*

- Nombre de jour de pluie et les classes de pluies

Tableau 5: Résultats du test de Pettitt sur la période de 1972-2012 appliqués au nombre de jour de pluie (P) et aux classes de pluie (P1, P2, P3 et P4)

Stations	Date de rupture				
	P	P1	P2	P3	P4
Kongoussi	1983	1983	absence de rupture	absence de rupture	absence de rupture
Bourzanga	1996	1997	absence de rupture	absence de rupture	absence de rupture
Kaya	1983	1983	absence de rupture	2001	absence de rupture
Tougouri	2002	2002	absence de rupture	absence de rupture	absence de rupture
Bogande	1996	1996	absence de rupture	absence de rupture	absence de rupture

Source : Auteur, 2013

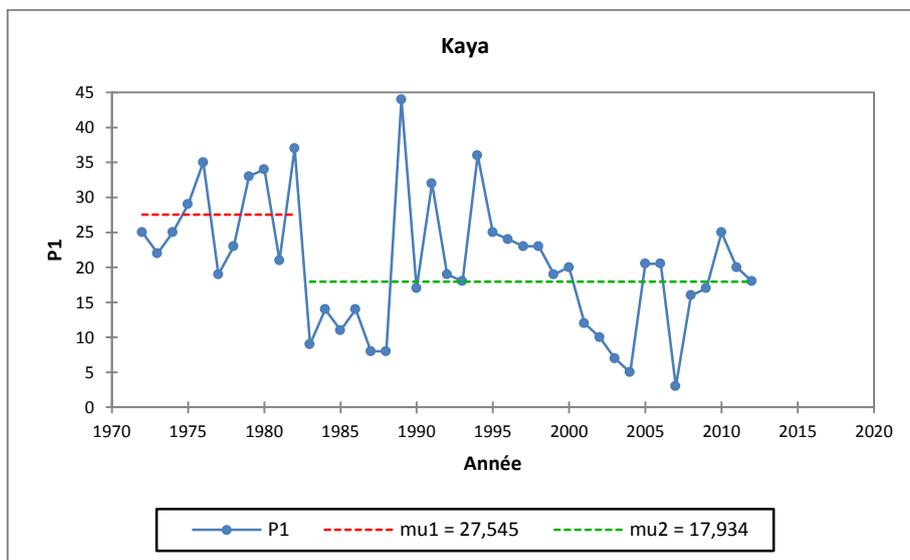
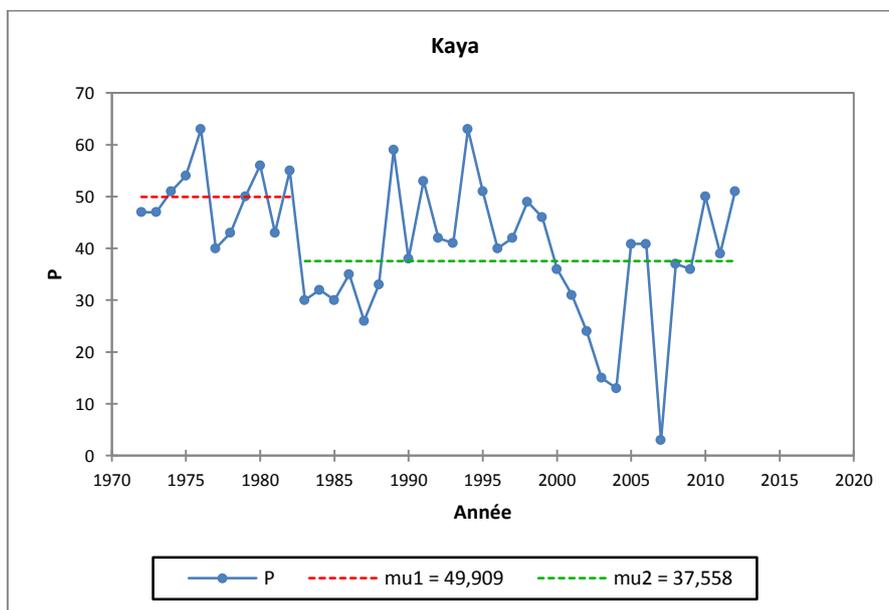
Ces résultats montrent que les différentes séries constituées des nombres de jours pluvieux ainsi que des classes de fréquence liées aux faibles hauteurs de précipitations notamment pour celle comprise entre 1 à 10 mm, contiennent des ruptures qui s’observent majoritairement autour des périodes 1983 et 1996. Une autre rupture a été identifiée à l’année 2002. Ces hétérogénéités identifiées traduisent une baisse de la fréquence des jours pluvieux ainsi que des hauteurs d’eau précipitées, entamée autour des décennies 1980-1990 (cf. Tab N° 7) à l’exemple de la Station de Kaya qui se trouve au Centre Sud (cette baisse est confirmée par la diminution des moyennes après la rupture). Tandis qu’on remarque une tendance de reprise à la hausse des fréquences des jours pluvieux et des hauteurs pluviométriques au début de l’année 1996 pour certaines stations comme Bogande dans l’Est.

Tableau 6: Comparaison du nombre moyen de nombre de jour pluvieux avant et après rupture

Stations	P moyenne avant la rupture	P moyenne après la rupture
Kongoussi	52,45	42,71
Bourzanga	49,33	40,466
Kaya	49,90	37,81
Tougouri	38,32	26,3
Bogande	40,73	56,18

Source : Auteur, 2013

Les figures suivantes montrent les trois principales ruptures qui existent dans la région avec μ_1 la moyenne avant rupture et μ_2 la moyenne après la rupture:



Source : Auteur, 2013

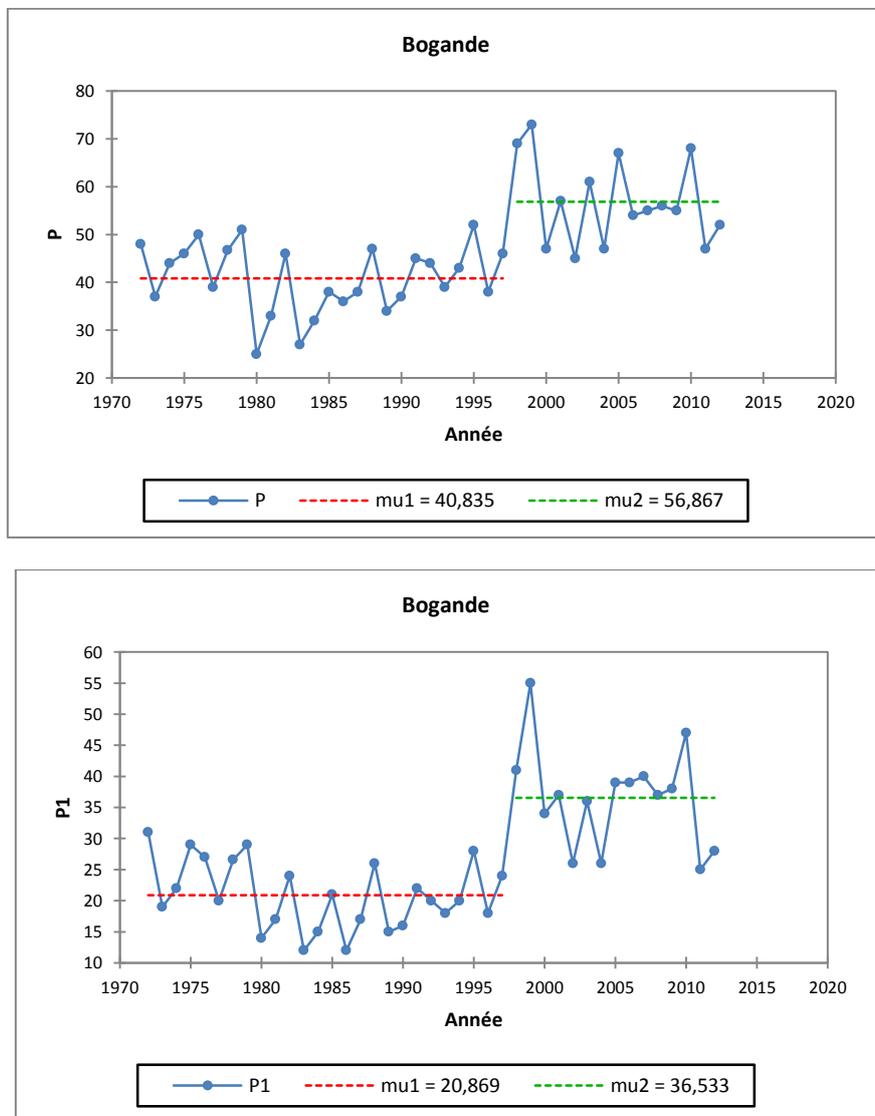
Figure 10: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Kaya (1972-2012)

En effet depuis le début de la décennie 1970, le Burkina Faso a été sous l'emprise d'une sécheresse chronique dont les étapes les plus critiques se sont manifestées en 1972-1974 et intensifiées en 1983-1984. Cette phase de sécheresse se distingue des autres sécheresses

historiques connues (1913-1914 et 1939-1943) aussi bien par son ampleur géographique que par sa durée.

C'est sans doute durant l'année 1970 que le déficit pluviométrique a été vraiment marquée pour les autres stations dont la rupture est absent pour la décennie 1980 .Ce qui montre aussi la variabilité spatio-temporelle des régimes pluviométriques de la région

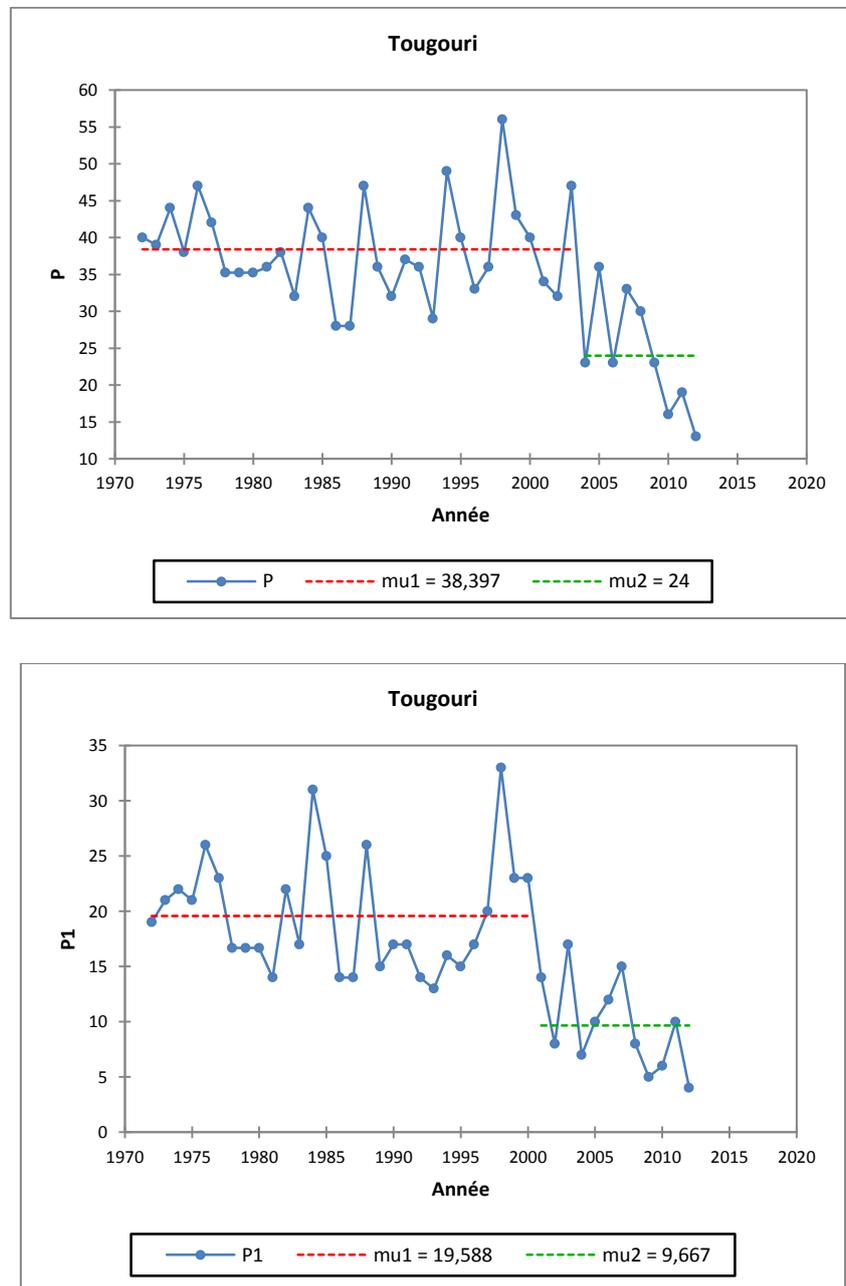
Pour les stations dont la rupture est détectée à partir de l'année 1996, ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'à partir de la décennie 1990, la sécheresse commence à s'atténuer au Burkina Faso et la situation pluviométrique semble « revenir à la normale » pour la plupart des stations.



Source : Auteur, 2013

Figure 11: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Bogande (1972-2012)

Pour le cas de Tougouri, Ceci montre d'abord la variabilité spatiale et aussi un retour à sécheresse pendant l'année 2002.



Source : Auteur, 2013

Figure 12: Evolution de la pluviométrie annuelle et du nombre de jours de pluie de la classe P1 à la station de Tougouri (1972-2012)

- Cumul annuel de pluie

Pareillement à ce qui a été vu auparavant, en ce qui concerne les cumuls annuels, ils sont homogènes ($p\text{-value} > \alpha$). La variabilité du régime pluviométrique pour la période choisie est perceptible surtout sur les fréquences de pluie.

Tableau 7: Résultats du test de Pettitt sur le période de 1972-2012 pour les cumuls annuels de pluies

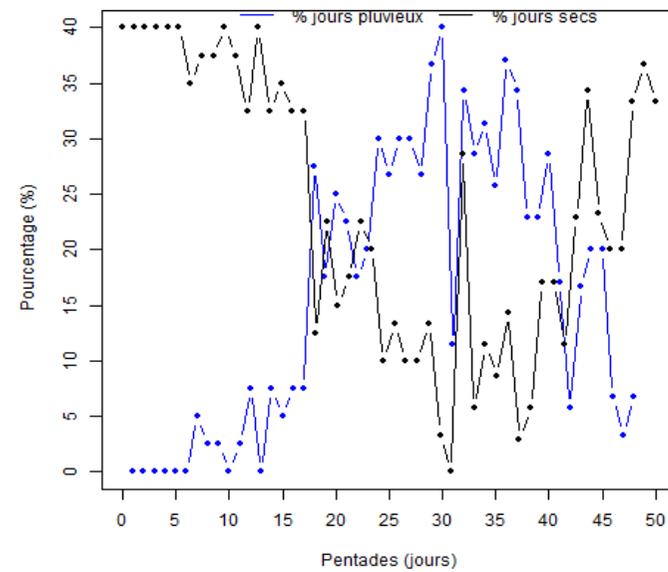
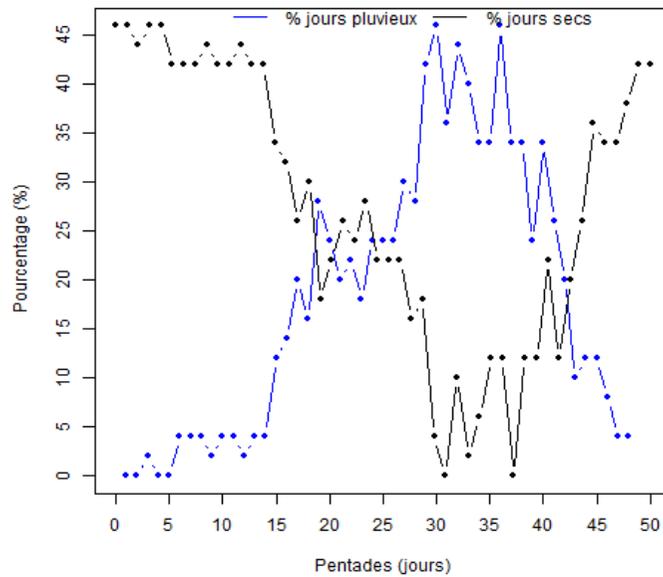
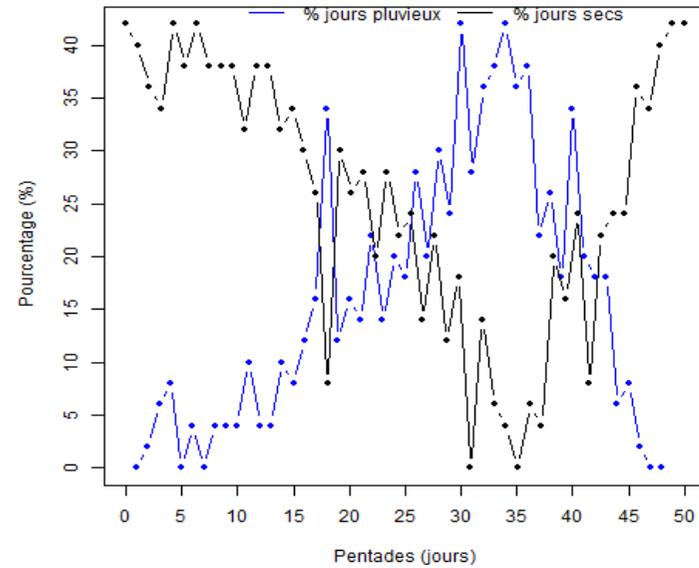
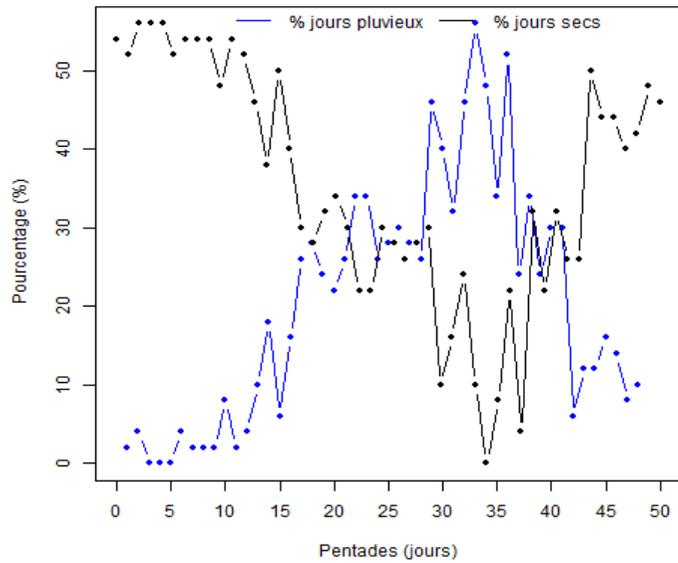
Station	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
p-value (pour $\alpha = 0,05$)	0,347	0,449*	0,449*	0,388	0,178

Source : Auteur, 2013

1.1.3. Analyse du début et de la fin de la saison des pluies

La variabilité des dates de début et de fin de la saison des pluies dans la région sur la période de 1972-2012 sera représentée par les stations de Kaya et de Kongoussi.

✓ Kaya



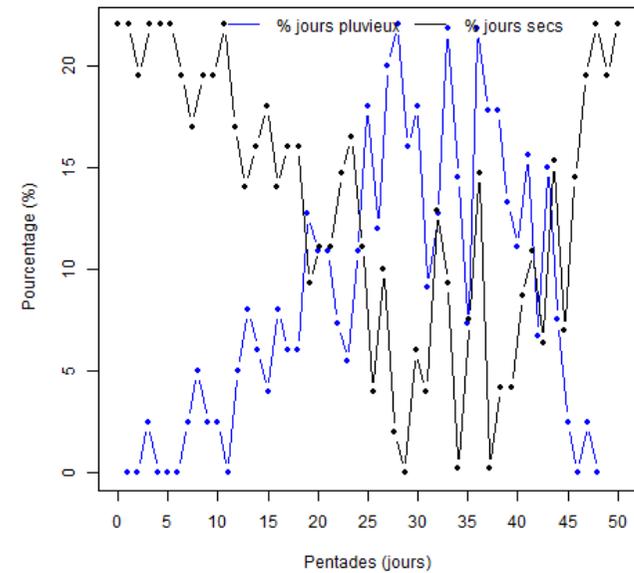
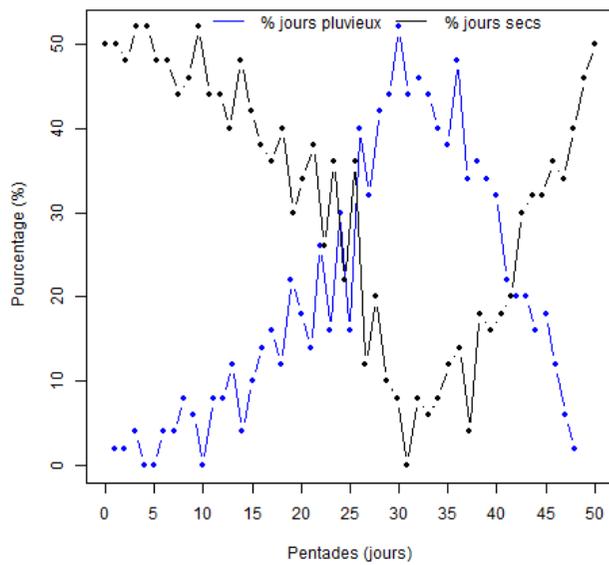
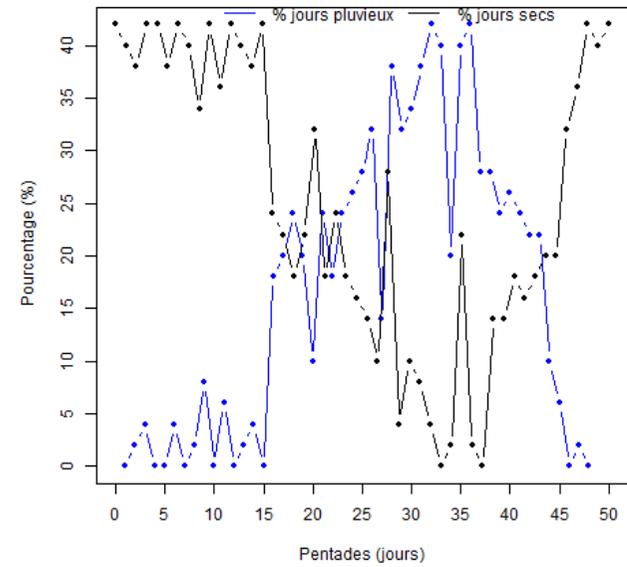
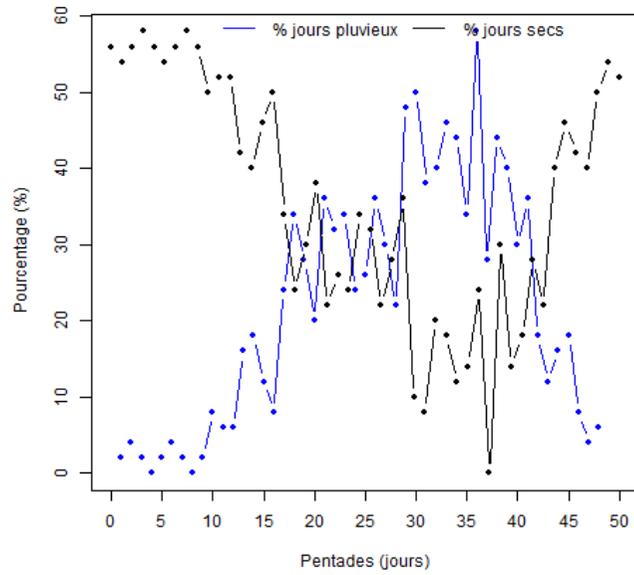
Source : Auteur, 2013

Figure 13: Variabilité du début et de la fin des saisons des pluies à la station de Kaya par décennie pendant les périodes 1972-2012

Ces figures font état d'une diminution de la longueur des saisons pluvieuses à la station de Kaya tout au long de la série, puisque la durée des saisons de pluies est passée de 20 pentades (100 jours) pour la décennie 1972-1982 à 14 pentades (70 jours) pour la décennie 1982-1992, soit une réduction moyenne de 6 pentades (30 jours). Ensuite la troisième décennie (1992-2002), est marquée par une légère augmentation du nombre de jours pluvieux qui est égale à 18 pentades (90 jours) et cette tendance est maintenue pour la dernière décennie (2002-2012). Tous ces résultats coïncident avec la période de rupture décrits précédemment.

En ce qui concerne le début et la fin de la saison de pluie, c'est durant la deuxième décennie qu'on constate un important retard sur l'arrivée des pluies qui est passée de la 22^{ème} pentade à la 26^{ème} pentade, c'est à dire avec un retard de 4 pentades (20 jours) pour la station de Kaya. Ensuite, pour la troisième et dernière décennie, le début s'est un peu avancé et revenu à la 22^{ème} pentade. Cependant, la fin reste plus ou moins inchangeable à une différence de 2 pentade (10 jours) en avance durant toute la période pour Kaya.

✓ Kongoussi



Source : Auteur, 2013

Figure 14: Variabilité du début et de la fin des saisons des pluies à la station de Kongoussi par décennie pendant les périodes

Pour la station de Kongoussi, le même cas que pour Kaya se présente pour la durée de la saison avec une réduction de 4 pentades (20 jours) à la deuxième décennie. La réduction de la durée de la saison cependant y continue jusqu' à arriver à 14 pentades (70 jours). Enfin, la tendance s'est plus ou moins stabiliser pour la dernière décennie.

Quant au début et fin de la saison de pluie, l'arrivée des pluies est retardée de 5 pentades (25 jours), durant la deuxième décennie. Pour Kongoussi, pendant la troisième et dernière décennie, le début de la saison continue d'accuser un retard et commence à la 25 et 26 ème pentade. Comme pour Kaya la fin ne varie pas trop, seulement de 1pentade (5 jours).

En outre cette réduction de début de la saison est accompagnée de plusieurs séquences de sècheresse à l'intérieur des saisons, ce qui explique l'existence recouvrements.

Tableau 8: Récapitulation des caractéristiques de la saison de pluie de deux stations dans la région du Centre Nord

Décennies	Stations	Début (pentade)	Durée (pentade)	Fin (pentade)
1972-1982	Kaya	22	20	42
	Kongoussi	18	24	42
1982-1990	Kaya	26	14	40
	Kongoussi	23	20	43
1990-2002	Kaya	24	18	42
	Kongoussi	26	14	40
2002-2012	Kaya	22	18	40
	Kongoussi	25	16	41

Source : Auteur, 2013

1.2. Variabilité des températures et humidités relatives de l'air

1.2.1. Température

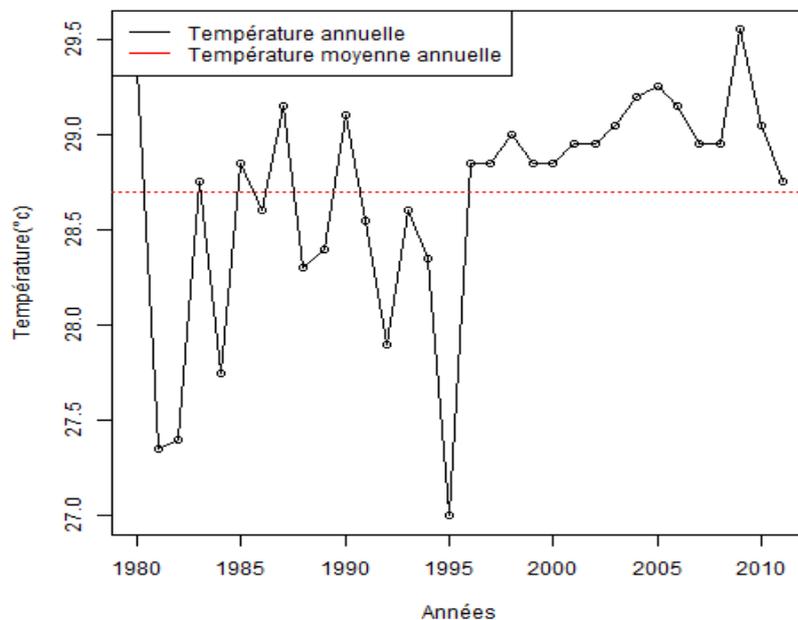
Les valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air de la période 1980-2011 pour la station de Bogande permettent de suivre l'évolution moyenne du régime thermique dans la région du Centre Nord (cf. Tab N°9).

Tableau 9: Températures mensuelles aux stations de Bogande (1980-2011)

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Températures mensuelles	16,2	19,3	23,3	26,8	27,3	25,3	23,6	23,6	23	23	23	16,2

Source : Auteur, 2013

Les températures moyennes mensuelles au niveau de Bogande varient entre 16,2 °C et 27,3 °C. Les moyennes mensuelles maximales sur la région s’observent en général pendant le mois de Mai et les minimales durant les mois de Décembre et Janvier.

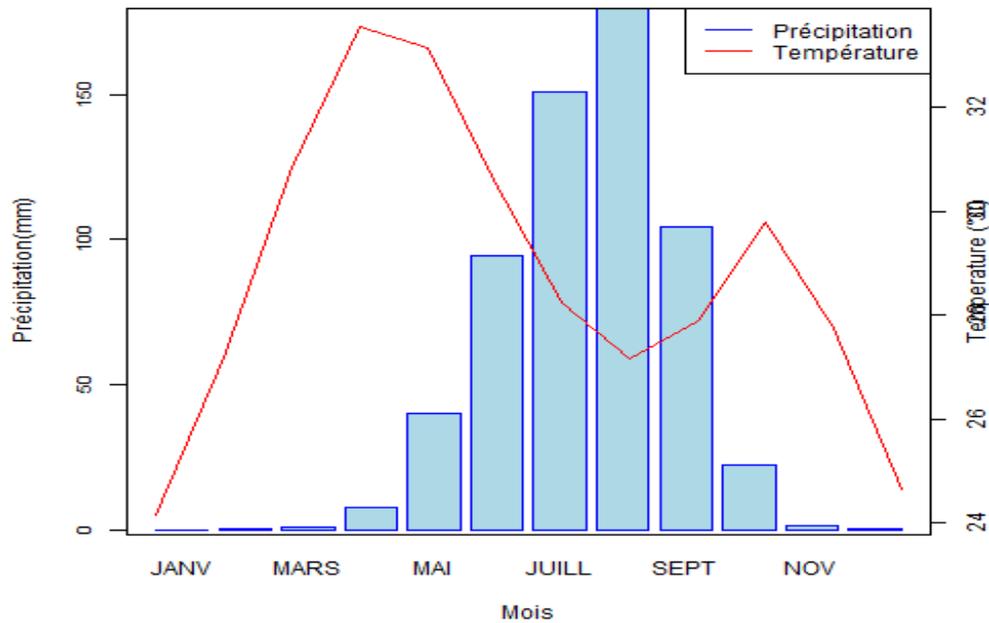


Source : Auteur, 2013

Figure 15: Variations interannuelles de la température de l'air à Bogande (1980-2011)

Les températures annuelles sont élevées dans l’ensemble, et varient beaucoup au sein des années avec un écart moyen de 1,72 °C et une moyenne de 28,7 °C. Pour la station de Bogande, on observe des valeurs supérieures à la moyenne entre 1983 à 1990, une rupture au niveau de l’année 1995 marquée par une diminution correspondant à la hausse du régime pluviométrique et une hausse remarquable par la suite et de plus en plus vers 2002. Il fait de plus en plus chaud sur l’ensemble de la région. Ces températures ont atteint les plus fortes valeurs au cours de l’année 2009.

Pour plus de précision, il est nécessaire d'analyser l'évolution de la hauteur d'eau par degré de température.



Source : Auteur, 2013

Figure 16:Diagramme ombrothermique (1980-2011) à Bogande

Les diagrammes reliant température et pluie ou diagramme ombrothermique, sur la série 1980- 2011 permettent d'observer, en général, de faibles valeurs de température pendant les mois de fortes pluviométries et de fortes valeurs de températures pendant les mois de faibles pluviométries. Ceci s'observe par exemple durant le mois d'Aout, Octobre et Avril.

1.2.2. Humidité relative de l'air

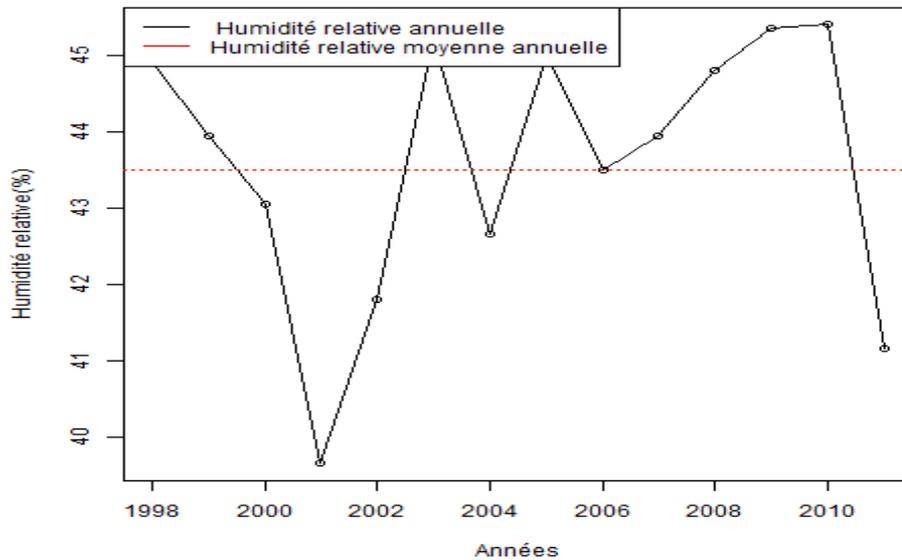
L'humidité relative s'exprime en pourcentage et se définit comme le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenu dans une masse d'air et la quantité de masse d'eau requise pour la saturation.

Tableau 10:Humidités relatives mensuelles moyennes (%) à Bogande sur la période 1980 à 2011

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Températures mensuelles	20,8	19,3	17,7	31,0	47,0	58,4	69,6	75,8	72,9	55,0	30,3	24,3

Source : Auteur, 2013

Au niveau de la station de Bogande, cette humidité relative varie entre 17,7 % (Mars) et 75,8 % (Aout). On peut déduire aussi que pendant les mois de fortes températures, l'humidité relative est minimale car en cet instant l'atmosphère augmente sa capacité à emmagasiner la vapeur d'eau sans subir de saturation.



Source : Auteur, 2013

Figure 17: Variations interannuelles de l'humidité relative de l'air de 1998 à 2011 à Bogande

L'humidité relative annuelle atteint généralement à 43 % à 45 % donc faible pour la station de Bogande (<50%). Les variations interannuelles de l'humidité relative sur la période 1998-2011 montrent qu'à Bogande, l'humidité relative a connu une baisse entre 1999-2001 et une reprise à la normale de 2003 à 2010.

En ce qui concerne cette partie, même si l'étude n'a pas pu être menée que sur une seule station par faute de données, il est à noter tout de même la variabilité interannuelle de ces paramètres dont la température et l'humidité relative dont les tendances sont respectivement à la hausse et légèrement déficitaire.

1.3. Détermination des facteurs climatiques qui influencent la pluviométrie

Les résultats matriciels présentés sont les matrices de corrélation entre les variables analysées à la station de Bogande et les matrices de valeurs propres.

Tableau 11: Matrice de corrélation des variables analysées à la station de Bogande :

Variables	Pmens	P	P1	p2	P3	P4	Tmoy	Tmax	Tmin	AT	HR moy	HRmax	HR min	AHR
Pmens	1	0,701	0,234	0,676	0,499	0,706	0,096	-0,042	0,134	-0,123	0,309	0,277	0,314	-0,002
P	0,701	1	0,825	0,504	0,290	0,509	0,055	0,055	0,022	0,012	0,556	0,529	0,529	0,103
P1	0,234	0,825	1	0,064	0,142	0,200	0,013	0,029	-0,006	0,020	0,513	0,502	0,473	0,142
p2	0,676	0,504	0,064	1	0,105	0,408	0,209	0,118	0,147	-0,049	0,369	0,349	0,353	0,062
P3	0,499	0,290	0,142	0,105	1	-0,050	-0,472	-0,440	-0,213	-0,069	-0,136	-0,193	-0,057	-0,242
P4	0,706	0,509	0,200	0,408	-0,050	1	0,432	0,240	0,307	-0,107	0,501	0,463	0,493	0,045
Tmoy	0,096	0,055	0,013	0,209	-0,472	0,432	1	0,447	0,786	-0,361	0,427	0,362	0,456	-0,070
Tmax	-0,042	0,055	0,029	0,118	-0,440	0,240	0,447	1	-0,201	0,673	-0,113	-0,071	-0,149	0,103
Tmin	0,134	0,022	-0,006	0,147	-0,213	0,307	0,786	-0,201	1	-0,860	0,546	0,446	0,602	-0,147
AT	-0,123	0,012	0,020	-0,049	-0,069	-0,107	-0,361	0,673	-0,860	1	-0,471	-0,374	-0,532	0,165
HR moy	0,309	0,556	0,513	0,369	-0,136	0,501	0,427	-0,113	0,546	-0,471	1	0,957	0,945	0,205
HRmax	0,277	0,529	0,502	0,349	-0,193	0,463	0,362	-0,071	0,446	-0,374	0,957	1	0,810	0,479
HR min	0,314	0,529	0,473	0,353	-0,057	0,493	0,456	-0,149	0,602	-0,532	0,945	0,810	1	-0,126
AHR	-0,002	0,103	0,142	0,062	-0,242	0,045	-0,070	0,103	-0,147	0,165	0,205	0,479	-0,126	1

Tableau 12: Valeurs propres des variables analysées à la station de Bogande

Dim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Variance	5.144	2.540	2.211	1.680	1.029	0.576	0.474	0.286	0.040	0.012	0.006	0.002	0.000
% of var.	36.746	18.142	15.795	12.003	7.347	4.115	3.387	2.043	0.287	0.083	0.041	0.012	0.000
Cumulative % of var.	36.746	54.888	70.683	82.686	90.033	94.148	97.535	99.578	99.864	99.947	99.988	100.000	100.000

Source : Auteur, 2013

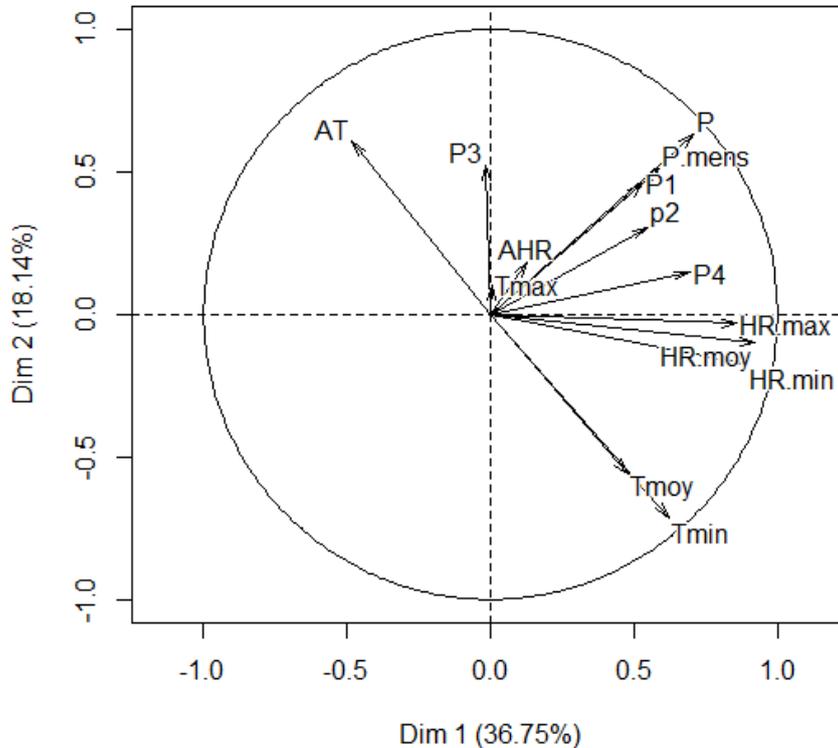
Le but de cette analyse de corrélation entre les variables est de vérifier le caractère redondant de ces variables. Il ressort de ce tableau que les fortes corrélations positive ($>0,7$) constatées lient des variables de même classe c'est-à-dire d'une part, les variables liées aux précipitations et d'autre part, les variables liées aux facteurs définissant les conditions atmosphériques. A l'exemple de HRmax et HR moy (0,957), AT et Tmin (0,860), P4 et Pmens (0,706) etc. Néanmoins, il est constaté également une moyenne corrélation positive (entre 0,5 et 0,7) entre les humidités relative HRmoy, HRmax, HRmin avec le nombre totale mensuel de jour de pluie P qui sont respectivement de 0,556 ; 0,529 ; 0,529 ensuite de P1 avec HR moy et HRmax avec comme coefficient de corrélation respectifs de 0,513. 0,502, ainsi que de P4 avec HRmoy de 0,501.

La corrélation positive signifie qu'une variation de l'humidité relative en générale peut induire une variation des paramètres liés aux pluies dont le nombre totale mensuel de jour de pluie et la fréquence des pluies de hauteurs comprises entre 1 à 10 mm sont supérieure à 50mm. Tous les deux paramètres suit la même évolution c'est à dire l'augmentation de l'humidité relative, provoque un accroissement des nombres moyens de jours de pluies par conséquent du cumul pluviométriques. Le cas contraire également est valable.

En ce qui concerne les valeurs propres de chaque facteur à la station de Bogande, seules les composantes principales dont les valeurs propres sont supérieures ou égales à 1 ont été considérées comme significatives pour les axes à retenir selon le critère de Kaiser mais cependant c'est seulement les deux (2) premières composantes parmi les treize (13) sont prises car non seulement elles remplissent largement cette condition (l'axe 1 représente 5,144 suivi de l'axe 2 de 2,140) et aussi parce que le poids des valeurs propres (pourcentage des variances) est plus importantes que les autres puisque la somme de F1 et de F2 représente 54,88 alors qu'en considérant F1 avec les autres axes le poids sera faible. On remarque que les deux plus grandes valeurs propres ont une variance cumulée de 54.88 %, donc presque 55%.

Donc ces deux (2) composantes contiennent l'essentiel des informations relatives aux matrices des données. Une projection de l'ensemble des données sur un espace à deux (2) dimensions permet d'avoir près de 55% de l'ensemble des informations sur la base.

L'analyse dans l'espace des variables a été réalisée dans les plans factoriels F1-F2 et rendent compte de manière satisfaisante de la structure des données.



Source : Auteur, 2013

Figure 18: Cercles de corrélations des variables analysées à la station de Bogande

L'axe 1 révèle la contribution des variables HR moy, HR min, HR max, P4 qui lui sont corrélés positivement. Ces derniers contribuent significativement à la formation de l'axe 1. Quant à la variable AT, sa contribution à la formation de l'axe 1 est moyenne mais aussi négative.

Ce constat confirme le résultat de la matrice de corrélation ; l'humidité relative influence la fréquence de jour de pluie de hauteur supérieur à 50mm, tandis que l'amplitude thermique ou variation de la température provoque un effet inverse. Dans un autre terme une baisse de l'humidité relative couplée à une hausse de la température entraînent une baisse pluviométrique. Une augmentation de l'humidité relative conjuguée à une baisse de la température se traduit par une augmentation de la pluviométrie.

L'axe 2 oppose deux groupes de variables : Celles qui contribuent positivement à la formation de l'axe qui sont les variables liés à la pluviométrie P3, P, P1, Pmens, P2, et celles qui contribuent négativement à la formation de l'axe qui sont Tmoy et Tmin.

Par déduction ,les deux paramètres ont des actions antagonistes vue leur position sur l'axe, c'est à dire que plus la température moyenne augmente, plus le nombre de jour de pluie et la classe de pluie de hauteur comprise entre 10 à 50 mm diminue, de même que si la température moyenne baisse ,tous ces variables pluviométriques connaît une hausse .

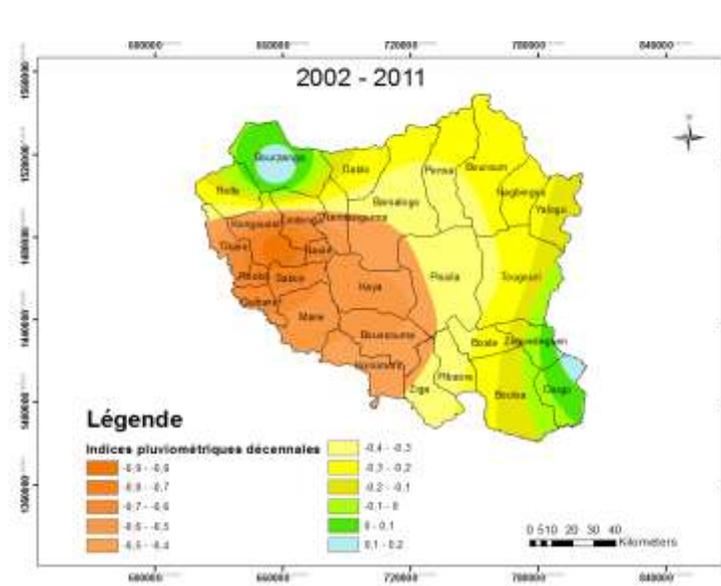
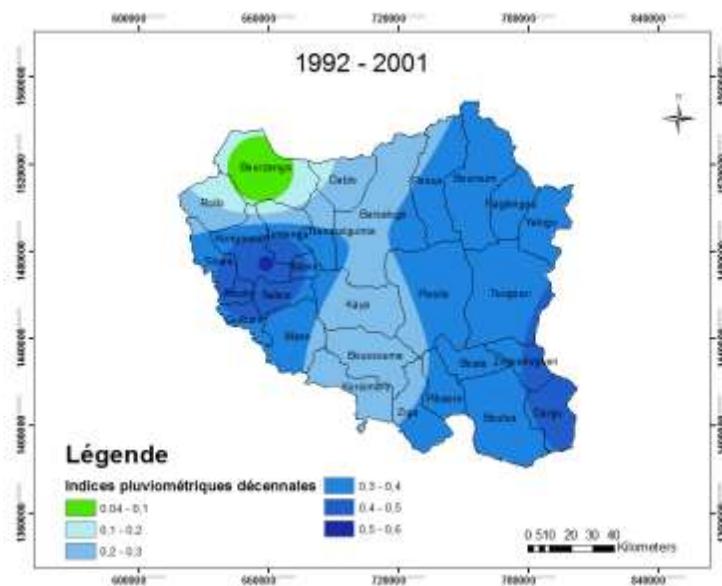
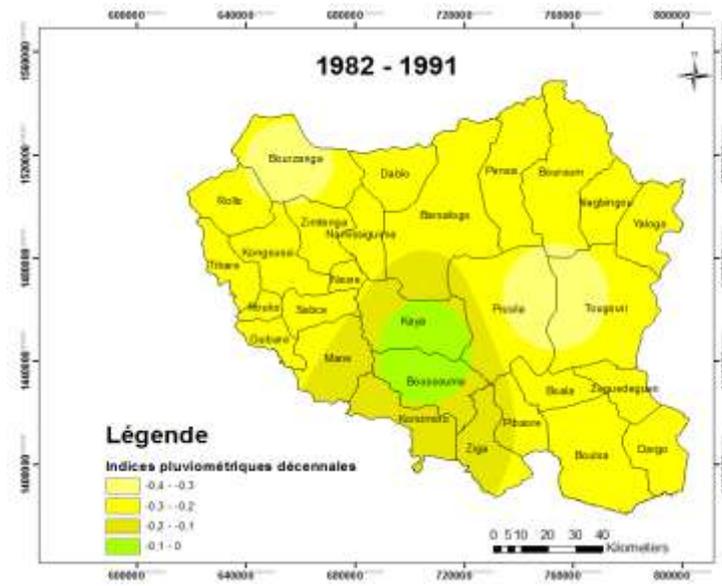
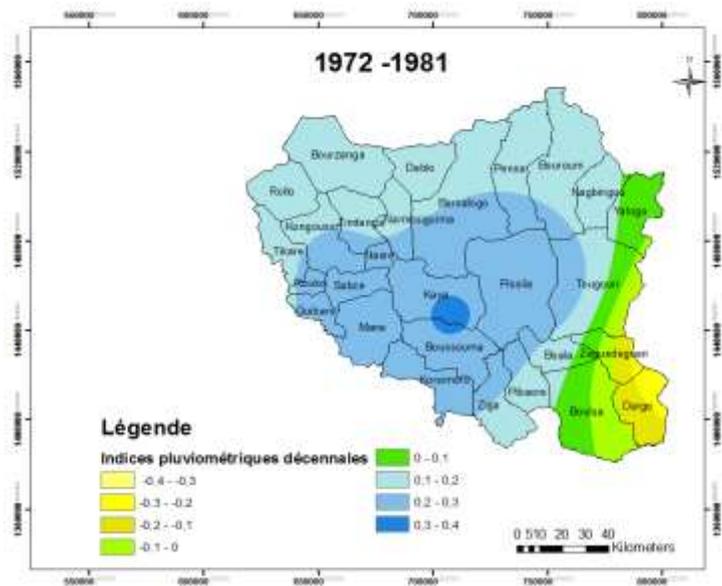
En somme, il est à constater une variabilité accrue du régime pluviométrique dans le temps marquée par une rupture durant l'année 1983 affectant surtout le nombre annuel et les fréquences de jours de pluies pour la plupart des stations de la région. De là commencent la tendance à la baisse de la précipitation. Ce déficit est corrélé avec la diminution de l'humidité relative à l'inverse de la température qui connaît une augmentation remarquable. Cette péjoration climatique se manifeste par la réduction de la saison de pluie qui s'explique l'arrivée en retard des premières pluies alors que la date de fin reste constante. Qu'en est-il de la répartition spatiale ?

2. Analyse de la répartition spatiale de la pluviométrie

Dans cette seconde partie, il sera analysé la variation spatiale du régime pluviométrique dans la région du Centre Nord par le calcul des pluies annuelles brutes et les indices pluviométriques qui seront représentés graphiquement.

2.1. Cartographie de l'indice pluviométrique

L'analyse de la variabilité spatiale des indices pluviométriques annuels au cours des différentes décennies, de 1982 à 2012, a permis de situer la pluviométrie de la région dans son contexte spatial.

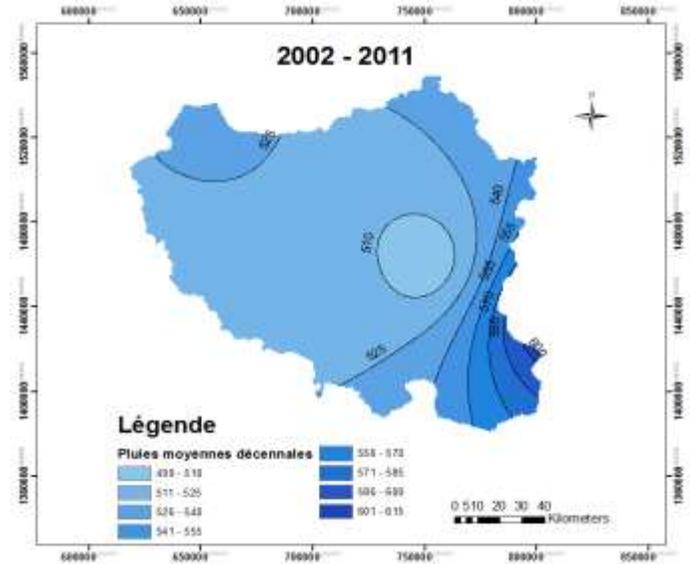
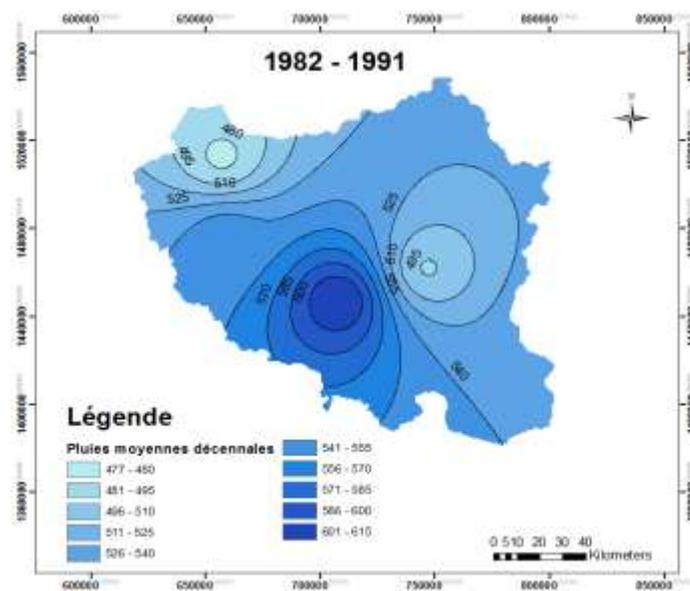
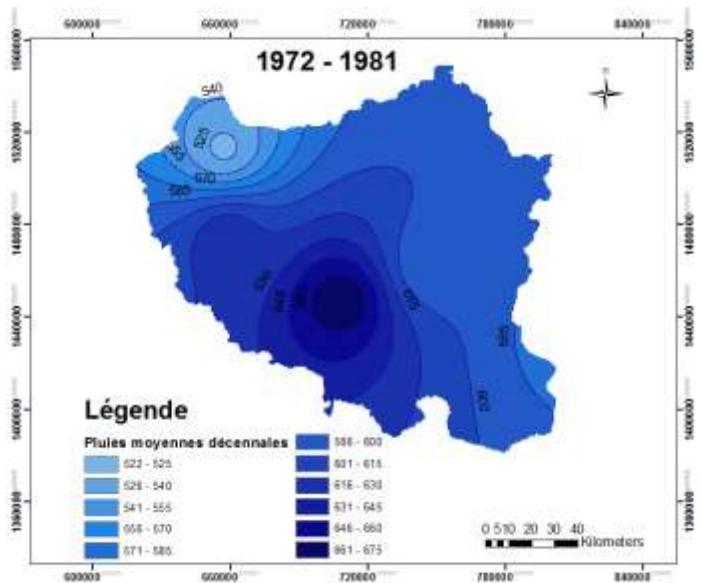


Carte 5: Répartition spatiale de l'indice pluviométrique moyenne décennale de la série 1972 - 2012

Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des indices pluviométriques sur l'ensemble de la zone. Les décennies 1972-1981 sont excédentaires ($>0,1$), cependant la région ne reçoit pas la même quantité de pluie, c'est la partie Centre Sud qui reçoit le plus de pluie. La décennie 1982-1991 apparaît comme déficitaire ($<0,1$), le phénomène s'étend avec une intensité plus ou moins importante sur l'ensemble de la zone étudiée, néanmoins c'est seulement dans une petite partie dans le Sud que l'indice est normal. Ce qui veut dire que cette petite partie a reçu une quantité de pluie normale. Cette déficience pluviométrique coïncide avec la période de rupture de la décennie 1980. Pour la troisième décennie 1992-2001, la situation semble revenir peu à peu à la normale en générale mais la répartition est très irrégulière, avec un déplacement du front excédentaire du Sud vers l'Ouest. Pour la dernière décennie 2002-2011, la tendance est redevenue déficitaire qui est très accentuée dans le Sud et Sud-Ouest sauf une petite extrémité de l'Ouest et Est.

2.2. Cartographie des pluies moyennes annuelles décennales

Pour pouvoir suivre l'évolution de la répartition spatiale des pluies moyennes pour chaque décennie de la série 1972-2012, le tracé des isohyètes est indispensable.



Carte 6 : Répartition spatiale des pluies moyenne décennales de la série 1972 - 2012

Pour la première décennie, les isohyètes varient entre 522 à 675 mm, avec comme zone la plus pluvieuse le Centre Sud et la moins pluvieuse dans le Nord-Ouest ce qui correspond à leur appartenance au deux zones climatiques la première soudano sahélienne et la deuxième, sahélienne. Pendant la deuxième décennie, le maximum de pluie a diminué jusqu'à 615 mm, avec apparition de l'isohyète de 477 mm dans la partie Nord-Ouest et diminution de la pluie moyenne dans l'Est. A la troisième décennie, la situation revient à la normale tandis que pour la fin de la décennie, le maximum de pluie (615 mm) s'éloigne de la région par la partie Est ; par contre la partie Ouest commence à bénéficier du front excédentaire. Remarquons quand même que les écarts vis à des cumuls annuels ne sont pas considérables, mais la variabilité spatiale est très forte.

Bref, en général la zone déficitaire en pluie se trouve dans la partie Nord et Ouest tandis que la zone excédentaire se trouve dans la partie Sud et Est. Cette situation semble se renverser suite au changement climatique qui s'est intensifié en 1982, avec une baisse très marquée.

3. Profil du régime pluviométrique à l'horizon 2025

3.1. Prévisions des tendances pluviométriques par le modèle ARIMA

3.1.1. Variabilité future des indices pluviométriques

Après avoir estimé les tendances et supprimé les effets de saisonnalités des séries pluviométriques (cf. Annexe N°10) le modèle ARIMA (1, 1, 1) a été choisi (cf. Fig N° 25). Les résultats de prévisions seront comparés aux résultats passés et actuels dans la partie ci-dessous.

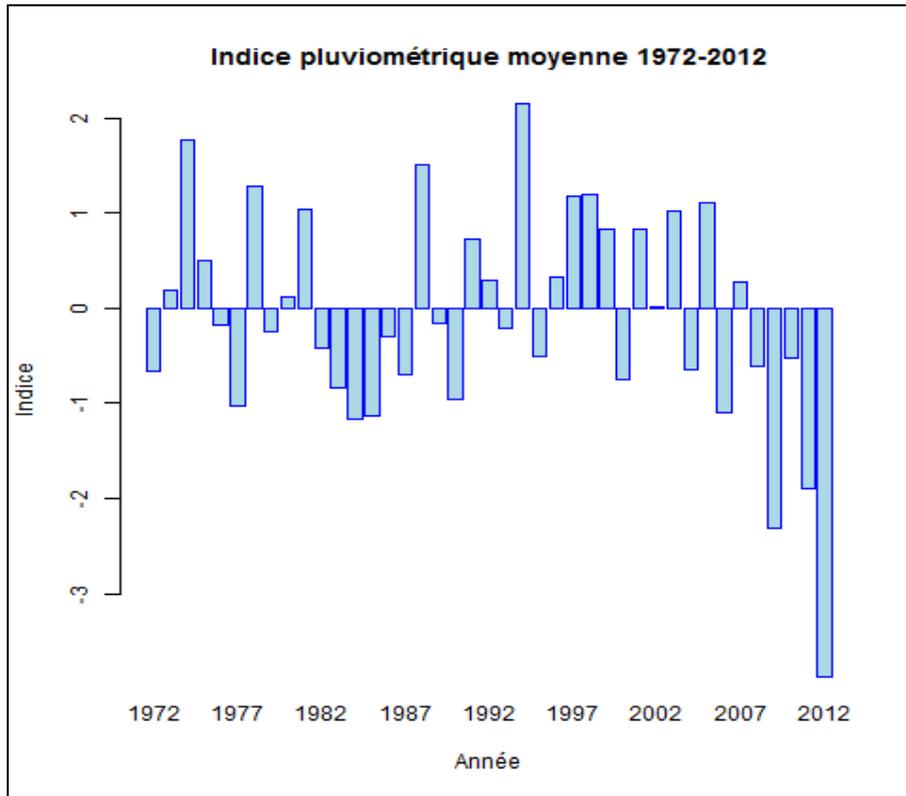
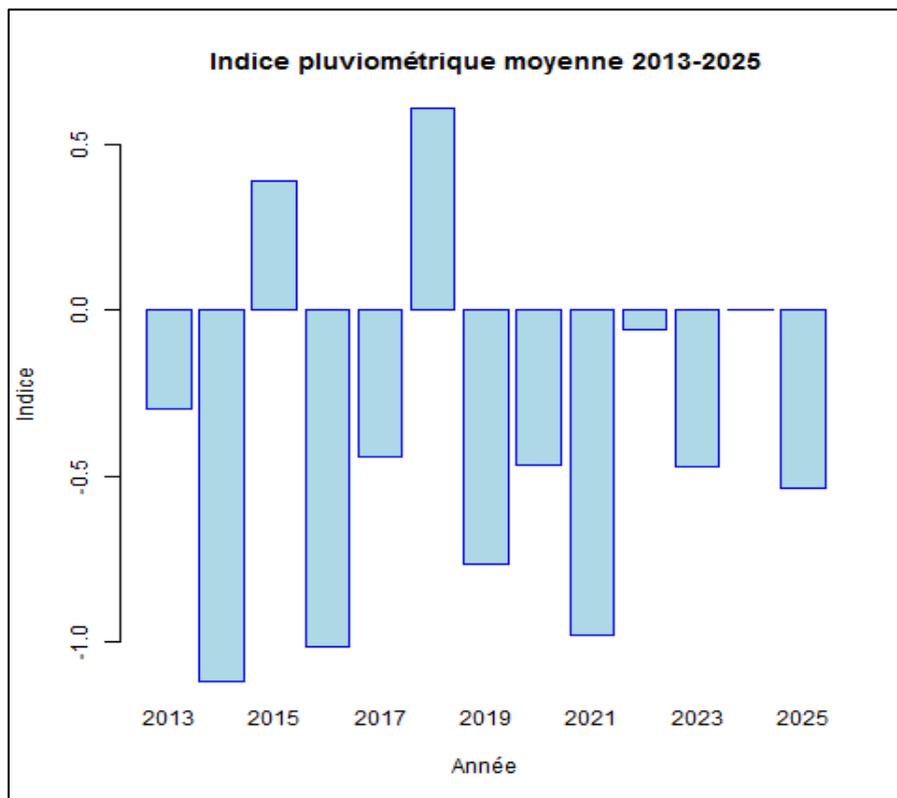


Figure 19: Evolution des indices pluviométriques moyens avec ARIMA pour la période 1972-2012



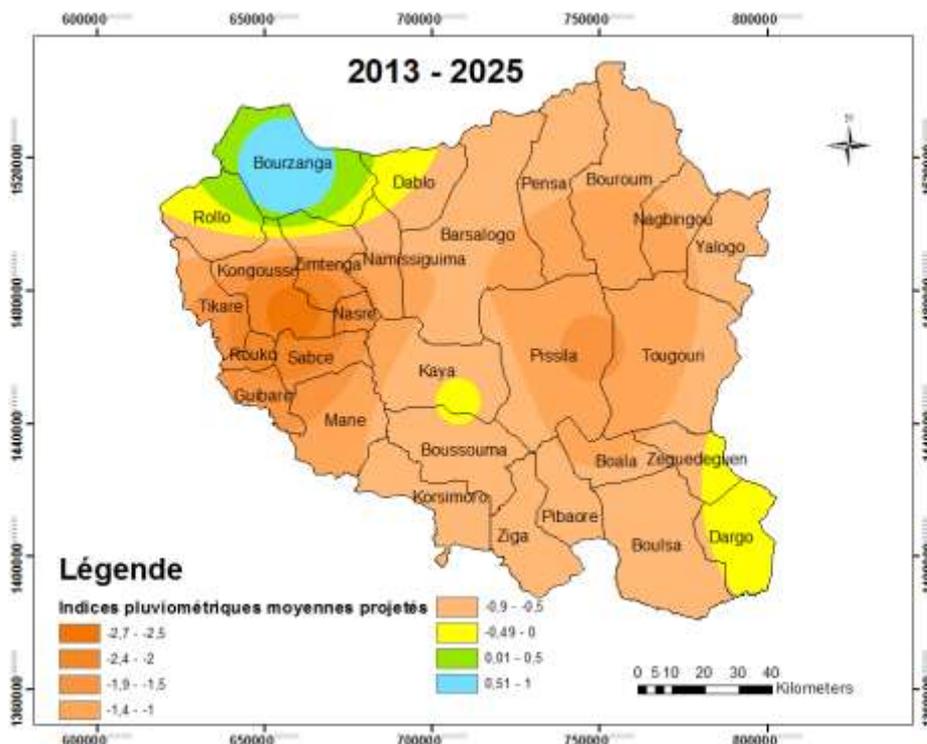
Source : Auteur, 2013

Figure 20: Evolution des indices pluviométriques moyens prédits avec ARIMA pour la période 2013-2025

Ces résultats montrent d'après ce modèle que la tendance du régime pluviométrique pour les dix (10) années à venir sera de plus en plus sèche puisque la plupart des indices pluviométriques moyennes prédites sont inférieures à -0,1 et peuvent atteindre jusqu'à -1,2 sauf pour deux années (supérieure à 0,1) d'indice normal qui sont 2015 et 2017. Donc une grande régression de la moyenne pluviométrique sera attendue par rapport à la série passée qui a eu au moins quelques pics d'humidité. La comparaison de la moyenne des indices de l'année 2012 à l'année 2025, révèle une différence de 0,21. D'une part, il est question de variabilité interannuelle puisque l'intensité de sécheresse ne sera pas la même à travers les années et d'autre part d'une variabilité spatiale, vu que les tendances dans chaque station ne sont pas identiques.

3.1.2. Projection spatiale des indices pluviométriques

C'est dans la station de Kongoussi que la sécheresse se manifestera le plus ensuite Tougouri et Kaya, alors que pour Bourzanga (station à l'extrémité Nord-Ouest de la région), les années à venir seront plus humides que les autres malgré la tendance déficitaire générale. Ce qui signifie que le front excédentaire commence à s'éloigner de la région tandis que le front déficitaire se rapproche du centre venant du Sud-Ouest et de l'Est.

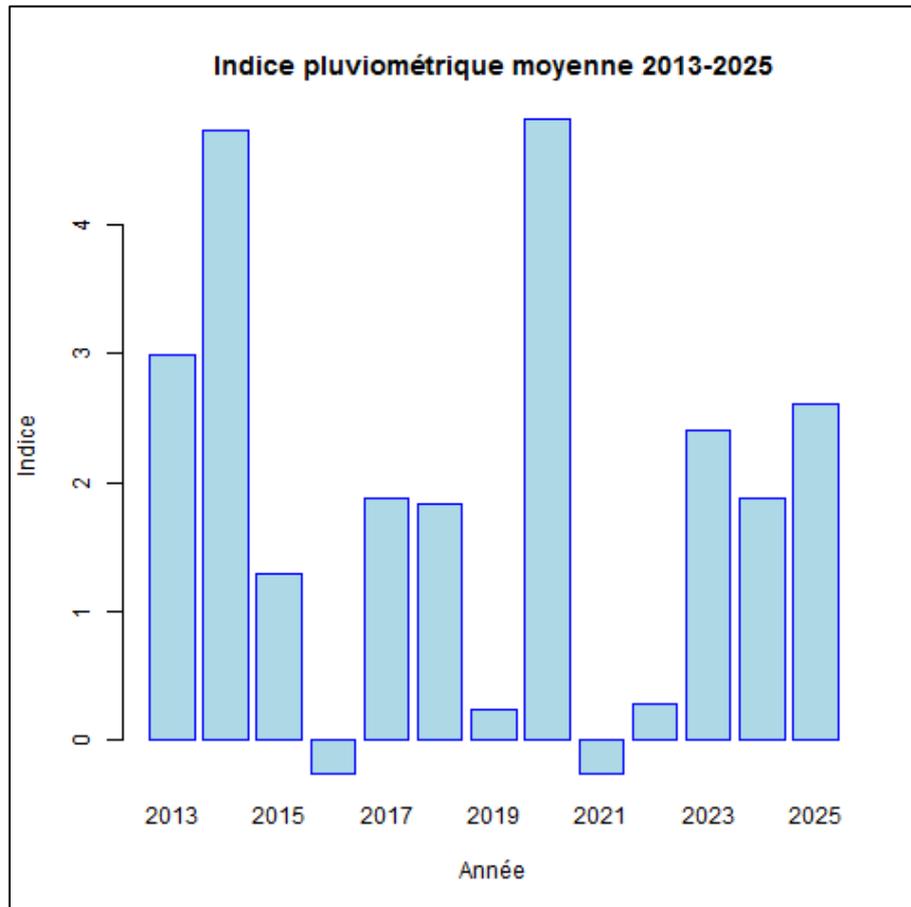


Source : Auteur, 2013

Carte 7: Répartition spatiale des indices pluviométriques prédites avec le modèle ARIMA

3.2. Projection des tendances pluviométriques à partir des données pluviométriques simulés

3.2.1. Variabilité future des indices pluviométriques

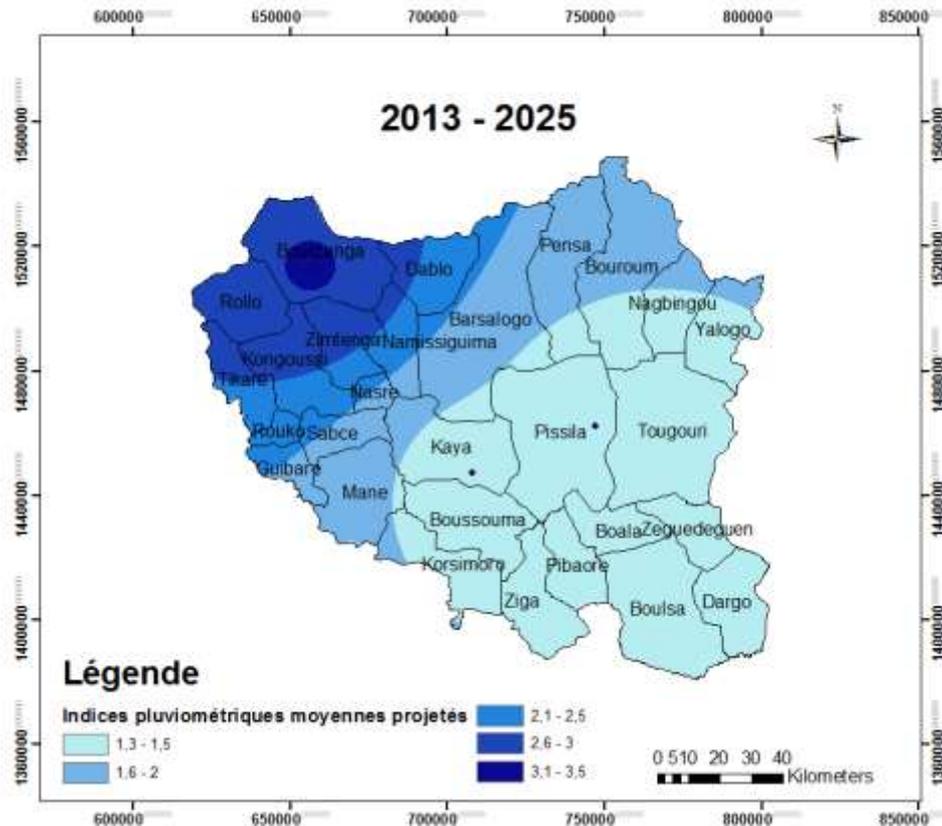


Source : Auteur, 2013

Figure 21: Evolution des indices pluviométriques moyens prédits le modèle RACMO pour la période 2013-2025

La projection des indices pluviométriques à partir des données pluviométriques simulées montre un résultat tout à fait inverse du modèle précédent. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que plusieurs paramètres du système climatique ont été incorporés dans la conception du modèle tandis que pour le modèle ARIMA, la projection ne reflète que le passé à l'aide de la méthode de régression. De plus le scénario choisi contribue aussi à ce résultat. En effet, nous pouvons constater ici une tendance vers l'humidité avec risque d'inondation pour certaines années puisque les indices maximaux peuvent atteindre une valeur maximale supérieure à 4.

3.2.2. Projection spatiale des indices pluviométriques



Source : Auteur, 2013

Carte 8 : Répartition spatiale des indices pluviométriques projetés avec le modèle RACMO

La répartition spatiale des indices pluviométriques de la région dans le futur résultante de cette simulation est irrégulière et maintient la tendance énoncée auparavant, c'est à dire l'Ouest recevra plus de pluie que l'Est. Cependant toute la région connaîtra une humidité exceptionnelle à l'horizon 2025.

En résumé, les deux modèles donnent deux résultats différents : le premier prédit une sécheresse, tandis que le deuxième projette une humidité. Néanmoins la répartition spatiale suit toujours la même tendance.

Chapitre III : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Discussions

La procédure de Test de Pettitt a permis de mettre en évidence la réalité d'une importante baisse des nombres des jours pluvieux dans la région à partir des années 1983 mais pas vraiment dans les cumuls annuels. Les travaux de Paturel *et al.* (1998) et Servat *et al.* (1998), ont montré que le nombre de jours de pluie a diminué en Afrique de l'Ouest à partir de la décennie 1970. Il semble que le phénomène ici s'est poursuivi jusqu'à la décennie 1980. En outre, ici la variabilité climatique constatée est liée en partie à la baisse des fréquences de jours pluvieux en général et aux pluies journalières de hauteur pluviométrique comprise entre 1 et 10 mm en particulier. Cependant, il a été dit que la baisse des fréquences de jours pluvieux est synchrone avec celle des hauteurs annuelles de pluie (Kouassi *et al.*, 2008), le résultat obtenu dans ce mémoire montre que c'est pas toujours vrai puisque la tendance des cumuls pluviométriques n'est pas significative pour la série 1982-2012. Toutefois, il est à constater une autre valeur de rupture comme l'année 1996 avec une tendance à la hausse, certes ceci montre l'hétérogénéité spatiale des changements mais soulève aussi la question de représentativité des stations vis-à-vis de la région. La modification constatée sur les fréquences de jours de pluie s'est accompagnée d'une modification de la durée des saisons pluvieuses. En effet, le début des saisons de pluie a accusé un retard dans la région d'où la réduction de la durée. Ce qui provoque des conséquences néfastes surtout du point de vue de la production agricole.

Il apparaît que la température et l'humidité relative de l'air sont des facteurs de la variabilité temporelle des régimes pluviométriques dans la région. En effet, ces paramètres atmosphériques influencent fortement la variabilité temporelle des variables pluviométriques. Or, les résultats précédents de l'étude montrent une baisse des variables pluviométriques, puisque, une baisse de l'humidité relative et une hausse des températures de l'air, a pour conséquence une affection du cycle hydrologique en général et la formation de nuages pluvio-gènes en particulier, d'où la faiblesse des hauteurs pluviométriques annuelles (Kouassi *et al.*, 2008).

La cartographie des indices pluviométriques et le tracé des isohyètes annuelles de la région du centre Nord a permis de mettre en évidence la tendance générale à la baisse de la pluviométrie à partir de la décennie 1982-1992 qui s'est atténué au cours des décennies

suivantes mais s'est aggravé par la suite. Cependant, l'ensemble du territoire n'a pas été touché de la même manière compte tenu de l'influence des climats locaux (climat sahélien au Nord et soudano sahélien au Sud) ; mais aussi à cause l'effet des reliefs même si c'est peu (Diem, 2003). Il faut noter quand même qu'il peut y avoir un léger biais liée à la représentativité d'une mesure ponctuelle extrapolée à une surface. Cependant, un renversement de la situation pourra être attendu dans la région.

Au fil des années cette variabilité du régime pluviométrique fait place à une sécheresse généralisée comme le montre le profil de la projection spatiale à l'horizon 2025 avec le modèle statistique ARIMA. Ceci peut être le résultat de l'effet combiné des phénomènes naturels et des actions anthropiques que subit la région d'ores et déjà (Zombré, 2006). Par contre le deuxième modèle climatique régionale démontre l'effet inverse sous les scénarios intermédiaire A1B (utilisation équilibré de l'énergie fossile et des énergies renouvelables, combiné à l'accroissement de la population). La contradiction entre ses deux modèles réside dans la nature même des modèles : le modèle statistique qui est une modèle de régression reflète le passé tandis que le modèle climatique est conçu en faisant intervenir plusieurs paramètres du système climatique. De plus, les scénarios jouent aussi un rôle important dans ce résultat. Néanmoins, que ce soit l'un ou l'autre modèle les enjeux ne seront pas négligeables pour les secteurs vulnérables au changement climatique dans la région.

Si la sécheresse s'accroît dans la région le déséquilibre environnemental s'aggravera. Pour le secteur de l'eau puisque la région est défavorisée en eau souterraine (PRD Centre Nord, 2010) alors que c'est la seule source d'approvisionnement en eau potable. Dans le cas contraire, surviendront les inondations et à la récurrence des maladies hydriques.

Avec le déficit pluviométrique, la production sera gravement en danger avec les conditions pédoclimatiques peu favorables ajouté aux moyens rudimentaires. De même pour l'élevage qui subira une réduction drastique des pâturages. Cependant en cas d'excès de pluviométrie les cultures seront ravagées, mais ce sera un point positif pour l'élevage.

En ce qui concerne la végétation, la région du Centre nord regorge d'une forte diversité biologique dont les produits forestiers non ligneux, mais la menace de sécheresses aggravées par les exploitations abusives de la population rend ces produits vulnérables et risque de disparaître. En effet, selon les projections indiquées dans le PANA, la région connaîtra une réduction du potentiel de biomasse qui se traduira par la disparition de certaines espèces

végétales et fauniques ainsi que la migration de certaines vers les régions soudaniennes. (SP/CONNED ,2011). Par contre, l'exacerbation des extrêmes pluviométriques pourrait « réveiller » des terres non productives, lever des dormances prolongées de semences forestières sauvages, etc., et avoir un effet positif sur la biodiversité.

Bref, la question n'est pas de savoir qui est le plus fiable des deux modèles puisque le monde de la modélisation climatique est truffé d'incertitude, Il faut plusieurs modèles pour pouvoir prédire le climat futur. Ainsi, il est encore nécessaire de faire une étude d'approfondissement sur les modèles de projection du climat pour une meilleure adaptation.

2. Recommandations : pistes d'adaptation

Face à ces enjeux il est indispensable de mener des actions d'adaptations .La mise en place et le choix d'une stratégie pour les différents types d'aménagement à établir dans la région suppose un diagnostic rigoureux et précis mettant en exergue les atouts et les contraintes liés à la variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique. Ce diagnostic doit partir de l'état initial du milieu et des impacts des politiques sectorielles en tenant compte des tendances passées, actuelles, des aspects institutionnels et économiques. De plus, les pistes d'adaptation suggérées doivent être explorées et évaluées par des études spécifiques, notamment à travers ces différents modèles climatiques.

Certes des options d'adaptations ont été déjà développés par les producteurs locaux notamment les techniques de conservations de l'eau et du sol (CES) et aussi des défenses et restauration du sol (DRS) tels que :les cordons pierreux [10] végétalisés, le traitement des ravines, mis en défens, Zai [11], la conservation du foin pour l'embouche de petits ruminants ...etc. (IUCN, 2011) surtout face à la sècheresse mais d' autres mesures peuvent être citées pour faire face au phénomène de changement climatique et tous les risques qui sont susceptibles de se produire:

- Des actions pertinentes comme l'assistance météorologique au sein des paysans pour aider les producteurs ruraux à mieux s'adapter : les paysans seront formés pour effectuer les mesures de pluies et l'observation phénologique en s'appuyant sur un manuel édité en langue locale.
- Habilitier les populations à s'engager dans des actions durables à travers des activités de gestion durable des terres, de gestion des catastrophes naturelles et gestion des

ressources forestières, végétales et fauniques par la conservation surtout ceux qui sont en voie de disparition.

- Actions visant l'augmentation de la biomasse pour pallier à la diminution attendue
- La constitution de stocks alimentaires en quantités adéquates et formation des producteurs éleveurs en production fourragère;
- L'extension des pratiques de conservation des eaux et des sols ;
- La recherche de spéculations à cycle court ;
- Les pratiques d'utilisation économique de la ressource en eau (irrigation goutte à goutte) et construction d'une grande retenue d'eau
- La protection des eaux de surface contre l'évaporation
- Le développement des énergies renouvelables et la promotion de foyers améliorés pour réduire la pression sur l'exploitation des ressources;
- Renforcement, redimensionnement et extension des infrastructures face aux catastrophes naturelles à l'exemple des vents violant (harmattan) résultant de la sécheresse mais aussi des inondations.

Le changement et la variabilité climatique agissent sur le milieu biophysique avec des conséquences dans le domaine de biodiversité, de la productivité agro-sylvo-pastorale et provoquant des catastrophes naturelles. De ce fait, il est indiqué que les acteurs intervenant dans la planification de l'adaptation maîtrisent mieux les effets attendus de ce changement climatique. Ce qui facilitera l'identification d'activités permettant de prévenir et réduire ces effets. Afin de permettre de mieux appréhender ce phénomène de changement climatique, il est proposé de mettre en place une commission spécialisée de veille et d'observation au niveau régionale qui sera une autorité décentralisée de l'Etat. Ce comité aura dans ses tâches la recherche de toutes les informations et la promotion des initiatives allant dans le sens de mieux maîtriser les questions climatiques de la région.

Tableau 13: Cadre logique

OG : Gestion et adaptation enjeux résultant de la variabilité spatio - temporelle du régime pluviométrique dans la région du centre Nord						
OS 1: Mise en place d'un comité de veille et d'observation au niveau de la région						
Action	Activités	Sous activités	Echéances	Responsables	IOV	SDV
Promotion des initiatives pour maîtriser les questions climatiques	Effectuation des diagnostics	Etude des atouts et contraintes de la variabilité pluviométrique avec les tendances passées	CT	Membre du comité de veille	Budget alloué à l'étude	Rapport d'étude
	Etude spécifique des modèles climatiques	Modélisation à l'échelle régionale	MT	Chercheur et membre du comité	Résultats des études	
OS2: Renforcement des capacités des acteurs intervenants dans l'adaptation au changement climatique						
Action	Activités	Sous activités	Echéances	Responsables	IOV	SDV
Formations sur les techniques d'adaptations au changement climatique	Assistance météorologique au sein des paysans	Formation sur les mesures de pluies et observations phénologique Elaboration du manuel édité en langue locale	CT	Direction régionale de la météorologie	Nombres de paysans formés	Rapport d'activités
	Habiliter les populations à s'engager dans des actions durables	Formation sur la gestion durable des terres et promotion des foyers améliorés	MT	DRAH DRECV		

Source : Auteur, 2013

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité du régime pluviométrique dans la région du Centre Nord au Burkina Faso et de confirmer l'hypothèse d'une dynamique spatio-temporelle des pluies annuelles passées et futures. La variabilité de la précipitation se manifeste également par, une récession des fréquences de jours pluvieux et une diminution de la durée des saisons pluvieuses de trente (30) jours. Quant aux facteurs qui influencent la variabilité temporelle des régimes pluviométriques saisonniers, il est apparu que les variables pluviométriques sont influencées par la température de l'air ainsi que l'humidité relative de l'air. En ce qui concerne la répartition spatiale, il est vrai que la partie Sud et Est reçoit plus de pluie que la partie Nord et Ouest mais le changement climatique semble provoqué le déplacement du front excédentaire vers l'Ouest et le Nord, tandis que des fronts déficitaires apparaissent dans le Sud et l'Est. Il faut noter que la prévision à l'horizon 2025 n'est pas optimiste quant à l'évolution de la pluviométrie étant donnée l'extension généralisée de la sécheresse sur toute la région pour le modèle statistique et un risque d'inondation pour le modèle climatique. Ainsi, il est dès lors important de mettre en place, dès que possible, des stratégies d'adaptation pour pouvoir faire face à une probable dégradation du régime pluviométrique, mais tous cela doit être précédé d'un diagnostic minutieux sur tout les plans économique, social, politique et environnemental et par le renforcement des capacités des acteurs intervenants.

Ces multiples approches ont permis d'obtenir des résultats intéressants et novateurs pour la région. Cependant, il apparaît essentiel d'étendre cette analyse à l'ensemble du Burkina Faso avec une plus longue série de donnée et plus de stations omis de lacune pour pouvoir lui donner une valeur scientifique légitime. Il serait également très intéressant d'entreprendre une analyse sur la perception des variations climatiques par les populations locales dans un contexte relatif d'amélioration des conditions pluviométriques. De plus, une étude des vulnérabilités des différents secteurs liés au climat surtout environnemental pourrait être effectuée, pour mieux engager le processus d'adaptation, en appliquant l'outil d'analyse « Pression-Etat-Impact-Réponse » (PEIR.) préconisé par l'OCDE en 1997. En effet, le modèle PEIR est un outil d'analyse et de gestion environnementale, pour prévenir les effets directs et indirects du fonctionnement de l'environnement considéré par l'ensemble de ses composants comme un système. Son but permet d'identifier les tendances et les solutions durables aux problèmes environnementaux, en fondant l'analyse de l'état de l'environnement sur des

facteurs causaux de la composante étudiée. Par ailleurs, ce serait plus astucieux d'améliorer la méthode de prévision du climat en ajoutant d'autres modèles avec des incertitudes réduites, soit avec une plus grande résolution, afin d'avoir des résultats fiables sur la variabilité future des paramètres pluviométriques tels que le nombre de jours de pluies et la pluie saisonnière. Dans l'avenir, des simulations pourraient être faites à partir des différents scénarios élaborés par le GIEC.

REFERENCES

- BATIONON D. (2009), *Changements climatiques et cultures maraichères*. Mémoire de Master II Recherche en géographie. Université d'Ouagadougou.
- CILSS /Centre Régionale Agrhymet (2010), « Le sahel face au changement climatique ». Bulletin mensuel du CILSS, numéro spéciale : p 43.
- CEDEAO-Club /Sahel/OCDE/CILSS (2008), *The Atlas on Regional Integration in West Africa*. Disponible dans: « www.atlas-westafrica.org».
- Conseil régionale pour le développement (2010), *Plan régionale du développement du Burkina Faso*.
- CUCCIA C., (2008), *changement climatique observés en Bourgogne depuis 1961 : étude des variations de températures et précipitation*. Mémoire de Master II recherche. Université de Bourgogne.
- DIEM J.E. (2003), "A critical examination of ozone mapping from a spatial-scale perspective". *Environmental Pollution*, vol. 125, n° 3: p 369-383.
- DGAT /DLR (2010), *Profil des régions du Burkina Faso*. Ministère de l'Economie et des Finances.
- DJIKAMBA B. (2007), *Impact de changement et variabilité climatique sur le régime pluviométrique de la ville province de Kinshasa. De 1961-2006 (Profil et perspective à l'horizon 2050)*. Licence. Université de Kinshasa.
- DOUKPOLO B. (2007), *Variabilité et tendances pluviométriques dans le nord-ouest de la Centrafrique: enjeux environnementaux*. DEA .Université d'Abomey- Calavi.
- ERPICUM M., BINARD M., PETERS J.P. & ALEXANDRE J. (1988), *Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (Exemples pris au Sénégal)*. In Erpicum M. (Ed.). Presses Universitaires de Liège.
- ESCOURROU G. (1978), *Climat et type de temps en Normandie*. Paris. Champion.
- HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J. P. & LUBES-NIEL H. (1998), « La procédure de segmentation, dix ans après » .Publication IAHS, n°250 : p 267-273.
- GIEC (2007), *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

- 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*. Thèse de doctorat à l'UPMC-France et 2IE-Burkina Faso .
- IUCN (2011), *Rapport synthèse des études de capitalisation des connaissances, pratiques, stratégies et technologies locales d'adaptation au changement climatique au Burkina Faso, Mali et Sénégal* .
- KOUASSI A. M., KOFFI F. K., KOFFI Y.B., KOUAKOU B. D., PATUREL J.E. & OULARE S. (2010), *Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'ouest : cas du bassin versant du n'zi (bandama) en côte d'ivoire*. Disponible dans : « cybergeog.revues.org ».
- LAWIN A .E., AFOUDA A., LEBEL T . (2011), « Analyse de la Variabilité du Régime Pluviométrique dans la Région Agricole d'Ina au Bénin ». *European Journal of Scientific Research* , Vol.50 No.3 : p 425-439
- Livre blanc de l'AMMA, (2012), *La mousson Ouest Africaine et ses composantes*.
- MAH (2011), *Monographie de la région du Centre Nord*.
- MECV/SP /CONNED (2006), *Programme d'action nationale d'adaptation au changement climatique du Burkina Faso*.
- MEF (2006), *Recensement général de la population et de l'habitation*.
- OMM (2006), *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondiale*.
- Organisation de Coopération et de Développement Economiques (1997), *Stratégie de l'Environnement de l'OCDE pour les dix premières années du XXIème siècle*.
- OUEDRAOGO M. *et al.* (2010), *Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations cas des paysans du Burkina Faso*. INERA.
- OZER, P., ERPICUM, M. (1995). « Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905 ». *Sécheresse* : p103-108
- PATUREL J.E., E. SERVAT, M. O. DELATTRE & H. LUBES-NIEL (1998), « Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahéenne dans un contexte de variabilité climatique ». *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, p43.

- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M. & BOYER J.F. (1998). « Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale ». IAHS Publications, 252: 323-336.
- PETTITT A.N., (1979). « A non-parametric approach to the change-point problem. Applied Statistics », 28: 126-135.
- ROMERO A., BELEMVIRE, A. & SAULIERE S. (2011), *Changement climatique et femme- agriculture du Burkina Faso, rapport de recherche de l'Oxfam*.
- SARR B (2009), *Evaluation du changement climatique en agriculture : étude de cas de l'Afrique de l'ouest*, Centre régionale Agrhymet / CILSS, Nyamei- Niger.
- SIVAKUMAR M.V.K. (1987). "Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa". Agricultural and Forest Meteorology, 42: 295-305.
- SORO D. T., SORO N., OGA Y.M.S., SORO L., GBOMBELE, KOUASSI E. A. & BIEMI J. (2011), *La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)* .Disponible dans: <http://physio-geo.revues.org/1581>.
- SP/CONNED (2011), *Rapport d'analyse relative à l'intégration des changements climatiques dans les différents plans dans la région du centre Nord*.
- SP/CONNED (2008), *Deuxième rapport sur l'état de l'environnement au Burkina Faso*. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- STERN R.D., DENNET M.D. & GARBUTT D.J. (1981). "The start of the rains in West Africa". International Journal of Climatology, 1: 59-68
- TESSILIMI C. & TIDJANI N. (2009), *Changements climatiques et évolution des variables météorologiques au Bénin : cas de la commune de Bohicon*.
- ZOMBRE P. (2010), « évolution de l'occupation des terres et localisation des sols nus dans le Centre Nord du Burkina Faso ».Télédétection, vol. 5, n°4 : p. 285-297.
- <http://www.mediaterre.org> : *Climat et changement dans l'environnement de Burkina Faso* ,26 /04/13.
- www.loria.fr/_sur/enseignement/modprev/, 15/06/13
- a.knmi2.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR302.pdf,10/07/13
- www.performancesconsulting.com, 04/03/13

ANNEXES

Annexe 1: Nombre de jour pluie et fréquences de jours de pluies à différent classe de hauteur par an pour chaque station

➤ Bourzanga

Années	P	P1	P2	P3	P4
1972	49	34	11	5	2
1973	48	32	14	3	0
1974	61	42	13	6	1
1975	57	35	16	6	1
1976	63	38	21	2	2
1977	55	38	16	1	0
1978	59	35	17	6	2
1979	56	38	16	3	0
1980	35	20	13	3	1
1981	55	36	16	2	1
1982	47	35	11	2	0
1983	39	19	16	3	1
1984	37	26	10	3	0
1985	31	18	11	2	1
1986	48	32	12	4	0
1987	42	29	10	4	0
1988	51	32	14	7	0
1989	45	26	18	4	0
1990	44	25	15	4	0
1991	53	32	17	5	0
1992	47	28	15	1	5
1993	46	29	16	3	0
1994	67	39	23	4	1
1995	49	31	19	1	0
1996	41	23	12	6	0
1997	45	32	11	3	0
1998	47	29	13	7	1
1999	48	29	17	0	4
2000	38	22	13	4	0
2001	39	22	13	6	0
2002	30	15	12	4	0
2003	41	19	20	6	0
2004	33	17	12	3	1
2005	36	18	17	2	0
2006	42	26	13	3	2
2007	35	17	15	0	4

Années	P	P1	P2	P3	P4
2008	46	24	18	6	1
2009	42	24	18	1	1
2010	46	27	13	6	1
2011	39	28	8	3	0

➤ Kaya

Année	P	P1	P2	P3	P4
1972	47	25	17	6	0
1973	47	22	17	11	0
1974	51	25	17	7	2
1975	54	29	19	6	3
1976	63	35	19	8	3
1977	40	19	12	8	1
1978	43	23	17	5	0
1979	50	33	14	3	0
1980	56	34	19	6	0
1981	43	21	18	5	1
1982	55	37	12	6	1
1983	30	9	14	6	1
1984	32	14	11	6	1
1985	30	11	15	4	0
1986	35	14	16	6	0
1987	26	8	13	3	2
1988	33	8	17	6	3
1989	59	44	12	6	1
1990	38	17	14	6	1
1991	53	32	15	5	4
1992	42	19	19	5	0
1993	41	18	18	6	1
1994	63	36	21	4	4
1995	51	25	22	9	0
1996	40	24	12	3	2
1997	42	23	14	5	1
1998	49	23	22	7	0
1999	46	19	20	7	3
2000	36	20	11	6	2
2001	31	12	16	5	0
2002	24	10	8	6	1
2003	15	7	4	3	1
2004	13	5	6	2	0
2005	40,9	20,5	15,4	5,3	1,2
2006	40,9	20,5	15,4	5,3	1,2

Années	P	P1	P2	P3	P4
2007	3	3	0	0	0
2008	37	16	19	2	2
2009	36	17	15	3	2
2010	50	25	18	7	1
2011	39	20	18	2	0
2012	51	18	28	4	2

➤ Bogande

Année	P	P1	P2	P3	P4
1972	48	31	9	5	3
1973	37	19	14	4	1
1974	44	22	17	5	1
1975	46	29	10	6	1
1976	50	27	22	4	1
1977	39	20	16	6	1
1978	46,7	26,6	16,025	4,425	1,35
1979	51	29	18	1	3
1980	25	14	9	3	1
1981	33	17	11	4	2
1982	46	24	15	8	0
1983	27	12	13	3	1
1984	32	15	17	2	0
1985	38	21	16	5	0
1986	36	12	17	5	2
1987	38	17	17	6	1
1988	47	26	18	2	2
1989	34	15	16	4	0
1990	37	16	15	5	2
1991	45	22	18	7	0
1992	44	20	20	4	0
1993	39	18	18	4	0
1994	43	20	11	10	3
1995	52	28	18	2	4
1996	38	18	16	4	2
1997	46	24	20	2	1
1998	69	41	23	3	3
1999	73	55	14	6	1
2000	47	34	13	1	1
2001	57	37	14	6	1
2002	45	26	13	5	1
2003	61	36	17	7	2

Années	P	P1	P2	P3	P4
2004	47	26	20	2	0
2005	67	39	22	6	3
2006	54	39	13	3	0
2007	55	40	12	4	1
2008	56	37	15	6	1
2009	55	38	15	0	3
2010	68	47	23	5	1
2011	47	25	18	6	1
2012	52	28	18	6	3

➤ Kongoussi

Année	P	P1	P2	P3	P4
1972	50	31	15	4	0
1973	48	27	18	2	2
1974	50	22	18	9	2
1975	59	37	19	4	1
1976	53	31	19	5	0
1977	44	31	10	3	1
1978	67	42	21	3	3
1979	60	41	18	2	0
1980	51	30	17	5	1
1981	47	24	14	8	3
1982	48	29	15	5	0
1983	38	20	15	3	0
1984	36	21	13	2	1
1985	39	25	12	1	1
1986	43	24	16	4	0
1987	30	12	15	2	2
1988	50	27	16	7	3
1989	49	28	17	5	0
1990	34	19	12	2	1
1991	48	26	17	7	1
1992	44	24	19	2	1
1993	35	15	14	6	1
1994	54	24	22	3	5
1995	43	27	12	5	0
1996	53	30	20	3	1
1997	70	45	19	5	2
1998	48	25	14	9	1
1999	57	32	20	5	2
2000	38	19	18	2	1

Années	P	P1	P2	P3	P4
2001	45	22	20	4	3
2002	35	13	18	7	0
2003	44	23	13	6	2
2004	40	21	15	3	1
2005	52	26	22	5	1
2006	45	28	19	1	0
2007	40	20	14	6	2
2008	44	23	22	0	1
2009	17	9	8	2	0
2010	51	31	18	4	0
2011	12	2	5	4	1

➤ Tougouri

Année	P	P1	P2	P3	P4
1972	40	19	17	5	0
1973	39	21	18	3	1
1974	44	22	17	4	4
1975	38	21	17	1	2
1976	47	26	19	3	3
1977	42	23	13	7	1
1978	35,2	16,7	14,7	3,8	1,0
1979	35,2	16,7	14,7	3,8	1,0
1980	35,2	16,7	14,7	3,8	1,0
1981	36	14	17	4	1
1982	38	22	13	3	0
1983	32	17	13	4	0
1984	44	31	13	2	0
1985	40	25	11	4	1
1986	28	14	11	3	0
1987	28	14	13	1	0
1988	47	26	11	9	0
1989	36	15	16	6	1
1990	32	17	13	6	0
1991	37	17	13	7	0
1992	36	14	19	2	1
1993	29	13	11	4	1
1994	49	16	22	10	2
1995	40	15	21	6	0
1996	33	17	13	2	2
1997	36	20	12	2	2
1998	56	33	19	5	2

Années	P	P1	P2	P3	P4
1999	43	23	17	3	1
2000	40	23	14	2	1
2001	34	14	19	2	0
2002	32	8	19	6	0
2003	47	17	21	7	3
2004	23	7	14	2	0
2005	36	10	24	2	1
2006	23	12	7	3	1
2007	33	15	12	4	2
2008	30	8	14	7	1
2009	23	5	15	1	1
2010	16	6	7	2	1
2011	19	10	6	2	1
2012	13	4	9	0	0

Annexe 2: Pourcentage des jours pluvieux par pentades (du 1er Mars au 31 octobre) pour la station de Kongoussi à chaque décennie de la série (1972-1983)

Pentade	1972-1982	1982-1992	1992-2002	2002-2012
1	2	0	2	0
2	4	2	2	0
3	2	4	4	2,5
4	0	0	0	0
5	2	0	0	0
6	4	4	4	0
7	2	0	4	2,5
8	0	2	8	5
9	2	8	6	2,5
10	8	0	0	2,5
11	6	6	8	0
12	6	0	8	5
13	16	2	12	8
14	18	4	4	6
15	12	0	10	4
16	8	18	14	8
17	24	20	16	6
18	34	24	12	6
19	28	20	22	12,7
28	20	10	18	10,9
22	36	24	14	10,9
23	32	18	26	7,3
24	34	24	16	5,5
25	24	26	30	10,9

Pentade	1972-1982	1982-1992	1992-2002	2002-2012
26	26	28	16	18
27	36	32	40	12
28	30	14	32	20
29	22	38	42	22
30	48	32	44	16
31	50	34	52	18
32	38	38	44	9,1
33	40	42	46	12,7
34	46	40	44	21,8
35	44	20	40	14,5
36	34	40	38	7,3
37	58	42	48	21,8
38	28	28	34	17,8
39	44	28	36	17,8
40	40	24	34	13,3
41	30	26	32	11,1
42	36	24	22	15,6
43	18	22	20	6,7
44	12	22	20	15
45	16	10	16	7,5
46	18	6	18	2,5
47	8	0	12	0
48	4	2	6	2,5

Annexe 3: Pourcentage des jours pluvieux par pentades (du 1er Mars au 31 octobre) pour la station de Kaya à chaque décennie de la série (1972-1983)

Pentades	1972-1982	1982-1992	1992-2002	2002-2012
1	2	0	0	0
2	4	2	0	0
3	0	6	2	0
4	0	8	0	0
5	0	0	0	0
6	4	4	4	0
7	2	0	4	5
8	2	4	4	2,5
9	2	4	2	2,5
10	8	4	4	0
11	2	10	4	2,5
12	4	4	2	7,5
13	10	4	4	0
14	18	10	4	7,5
15	6	8	12	5

Pentade	1972-1982	1982-1992	1992-2002	2002-2012
16	16	12	14	7,5
17	26	16	20	7,5
18	28	34	16	27,5
19	24	12	28	17,5
28	22	16	24	25
22	26	14	20	22,5
23	34	22	22	17,5
24	34	14	18	20
25	26	20	24	30
26	28	18	24	26,7
27	30	28	24	30,0
28	28	20	30	30,0
29	26	30	28	26,7
30	46	24	42	36,7
31	40	42	46	40,0
32	32	28	36	11,4
33	46	36	44	34,3
34	56	38	40	28,6
35	48	42	34	31,4
36	34	36	34	25,7
37	52	38	46	37,1
38	24	22	34	34,3
39	34	26	34	22,9
40	24	18	24	22,9
41	30	34	34	28,6
42	30	20	26	17,1
43	6	18	20	5,7
44	12	18	10	16,7
45	12	6	12	20
46	16	8	12	20
47	14	2	8	6,7
48	8	0	4	3,3
49	10	0	4	6,7

Annexe 4:Températures maximale et minimale annuelles pour la station de Bogande

Année	Tmax	Tmin
1980	36,7	22,0
1981	35,2	19,5
1982	34,6	20,2
1983	36,7	20,8
1984	34,1	21,4
1985	35,4	22,3
1986	35,2	22,0

Année	Tmax	Tmin
1987	36,4	21,9
1988	35,3	21,3
1989	35,6	21,2
1990	36,2	22,0
1991	35,1	22,0
1992	33,9	21,9
1993	35,3	21,9
1994	35,3	21,4
1995	35,3	18,7
1996	35,3	22,4
1997	35,0	22,7
1998	35,4	22,6
1999	35,3	22,4
2000	35,4	22,3
2001	35,4	22,5
2002	35,2	22,7
2003	35,3	22,8
2004	35,3	23,1
2005	35,4	23,1
2006	35,6	22,7
2007	35,1	22,8
2008	34,6	23,3
2009	35,7	23,4
2010	35,3	22,8
2011	35,3	22,2

Annexe 5: Humidité relative maximale et minimale annuelle pour la station de Bogande

Année	Hmax	Hmin
1998	61,5	28,3
1999	61,4	26,5
2000	60,7	25,4
2001	55,7	23,6
2002	58,0	25,6
2003	62,4	28,0
2004	60,0	25,3
2005	61,7	28,3
2006	59,5	27,5
2007	60,4	27,5
2008	60,8	28,8
2009	61,8	28,9
2010	61,7	29,1
2011	57,3	25,0

Annexe 6: Résultat des calculs des indices pluviométriques

Année	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
1972	-0,654	0,250	-0,191	0,092	0,478
1973	0,188	-0,878	0,798	0,294	-0,416
1974	1,758	-0,878	0,959	1,389	0,183
1975	0,497	1,488	1,298	0,027	0,436
1976	-0,183	1,719	1,780	1,173	0,509
1977	-1,035	-0,905	-0,012	0,413	-0,021
1978	1,278	2,135	-0,427	0,100	-3,867
1979	-0,250	-0,277	-0,882	0,100	0,536
1980	0,117	-0,684	0,064	0,100	-1,510
1981	1,040	0,444	0,075	0,304	-0,670
1982	-0,421	-1,303	-0,050	-0,991	0,011
1983	-0,837	-0,296	-0,239	-0,834	-1,251
1984	-1,168	-1,552	-0,357	-0,823	-1,320
1985	-1,129	-0,952	-0,906	-0,279	-0,702
1986	-0,296	-0,813	-0,167	-1,136	0,269
1987	-0,704	-1,192	-0,244	-1,594	0,233
1988	1,504	0,398	0,943	0,917	0,162
1989	-0,166	-0,268	-0,095	0,349	-0,590
1990	-0,949	-0,231	0,022	-0,411	0,065
1991	0,725	0,435	1,230	0,345	0,175
1992	0,295	1,340	-0,336	-0,054	0,239
1993	-0,219	-0,656	0,044	-0,555	-0,489
1994	2,156	2,135	1,724	2,666	1,566
1995	-0,514	-0,600	0,441	0,603	1,076
1996	0,332	0,333	-0,325	0,046	0,710
1997	1,181	-1,247	-0,499	-0,246	-0,157
1998	1,198	0,666	0,520	1,542	1,818
1999	0,822	0,869	1,586	0,006	0,620
2000	-0,755	-0,545	0,128	-0,473	-0,976
2001	0,836	0,222	-0,625	-0,419	0,425
2002	0,016	-0,795	-0,936	0,557	0,117
2003	1,024	1,072	-1,340	2,459	1,047
2004	-0,644	-0,841	-2,118	-1,040	-0,201
2005	1,114	-1,081	0,189	0,789	1,979
2006	-1,093	0,379	0,189	-1,326	-0,928
2007	0,277	0,610	-3,406	0,203	-0,526
2008	-0,619	1,202	0,070	0,260	0,382
2009	-2,315	0,056	-0,272	0,220	-0,042
2010	-0,516	0,952	0,788	-1,216	0,371
2011	-1,890	-1,432	-0,838	-1,331	0,259
2012	-3,873	0,721	1,419	-2,223	

Annexe 7:Pluviométrie moyenne par trentenaire pour chaque station

	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
1er trentenaire	606,3285714	505,183871	647,167742	561,75882	568,964516
2ème trentenaire	578,3933333	502,425806	596,387781	527,4	608,606452

Annexe 8:Précipitation mensuelle pour la station de Bogande

Mois	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	nov	dec
1972	0	0	0	23	92	117	61	190	130	38	0	0
1973	0	0	0	30	22	72	167	98	126	4	0	0
1974	0	0	0	0	59	46	188	220	81	14	0	0
1975	0	0	0	9	13	98	295	151	78	2	0	0
1976	0	0	0	5	88	56	109	186	89	124	0	0
1977	0	0	0	5	1	61	172	237	83	18	0	0
1978												
1979	0	0	0	6	27	102	142	177	115	32	60	0
1980	0	0	0	0	51	92	62	121	27	0	0	0
1981	0	0	0	0	77	89	90	118	102	4	0	0
1982	0	0	0	0	87	86	83	188	102	35	0	0
1983	0	0	0	0	4	82	98	83	124	2	0	0
1984	0	0	0	0	125	85	78	90		4	0	0
1985	0	0	0	10	8	39	137	145	137	0	0	0
1986	0	0	0	0	31	129	134	171	153	2	0	0
1987	0	0	0	0	12	150	178	151	119	5	0	0
1988	0	0	0	34	17	132	136	242	44	0	0	0
1989	0	0	0	0	6	36	137	207	100	0	0	7
1990	0	0	0	8	38	136	179	98	112	19	0	0
1991	0	0	9	8	121	79	93	219	34	43	0	0
1992	0	0	0	6	53	89	181	198	65	24	0	0
1993	0	0	0	0	23	77	141	142	67	56	0	0
1994	0	0	12	0	22	77	192	294	155	63	0	0
1995	0	0	0	8	71	194	120	271	41	38	0	0
1996	0	0	0	15	10	82	232	184	116	48	0	0
1997	0	0	16	19	11	48	91	203	143	25	0	0
1998	0	0	0	17	91	138	300	117	170	21	0	0
1999	0	0	0	5	19	54	176	216	195	8	0	0
2000	0	0	0	8	13	68	187	116	23	18	0	0
2001	0	0	0	0	55	194	174	108	76	36	0	0
2002	0	0	0	0	47	91	81	217	122	40	0	0
2003	0	1	0	1	9	204	220	164	126	13	0	0
2004	0	0	0	8	45	43	219	134	102	0	0	0
2005	0	0	1	23	71	77	254	299	142	11	0	0
2006	0	0	0	6	2	39	85	193	95	22	0	0

Mois	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	nov	dec
2007	0	0	0	27	33	56	110	181	95	0	0	0
2008	0	0	0	5	13	217	179	76	95	52	0	0
2009	0	0	0	2	28	67	53	281	114	29	0	0
2010	0	0	0	3	56	120	149	215	82	12	0	0
2011	0	0	0	4	12	95	153	235	97	23	0	0
2012	0	0	0	18	40	65	209	261	199	14	0	0

Annexe 9: Résultat de la modélisation des paramètres pluviométriques avec le modèle ARIMA

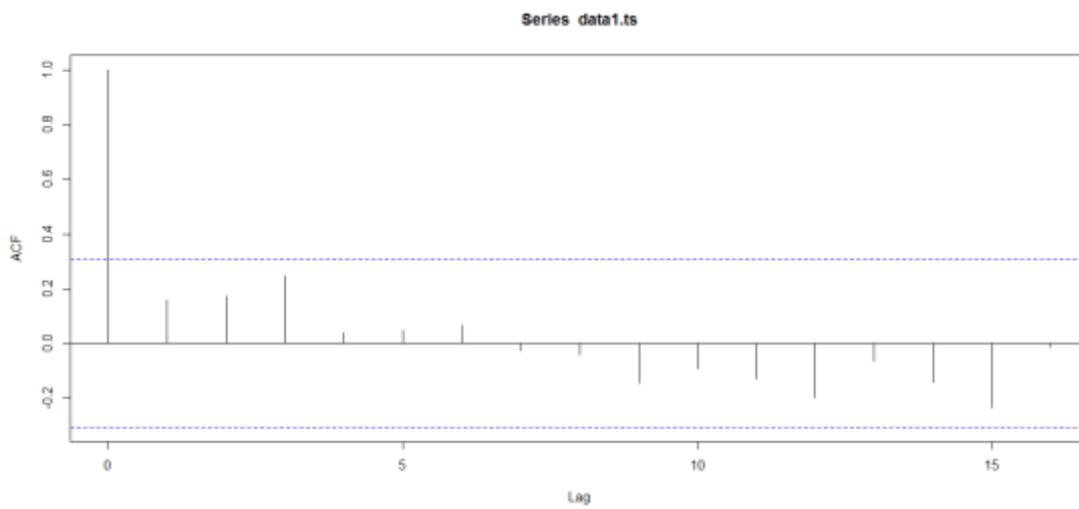
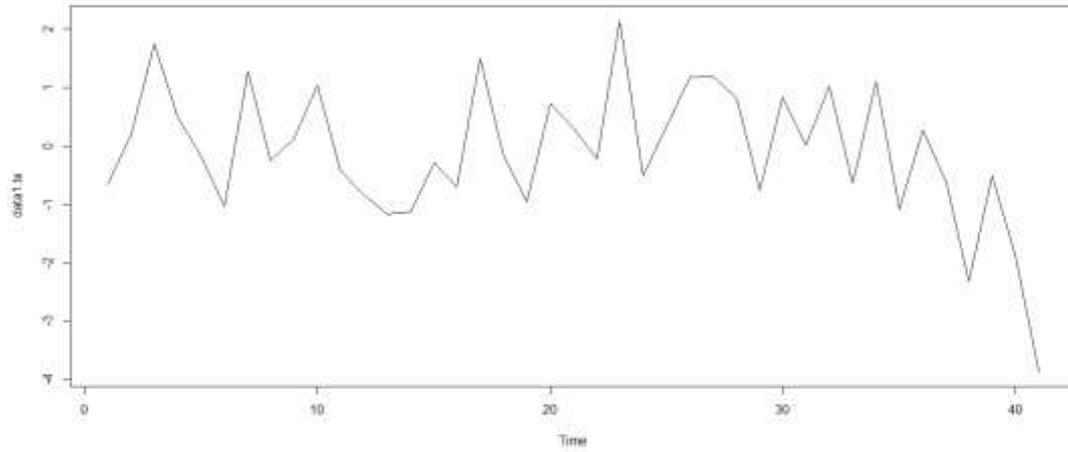
➤ Résultats de prédiction des indices

Année	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
2013	-2,21	0,5	-0,59	0,85	-0,03
2014	-2,63	-0,64	-0,73	-0,42	-1,18
2015	-2,02	1,66	-0,22	1,91	0,62
2016	-2,66	1,25	-0,75	-2,47	-0,45
2017	-1,92	-0,69	-0,49	0,57	0,31
2018	-2,34	2,8	0,41	1,95	0,23
2019	-2,87	0,64	-0,45	-0,91	-0,23
2020	-3,25	2,32	-1,06	-0,47	0,13
2021	-3,21	0,08	-1,02	-0,48	-0,26
2022	-2,17	1,66	-0,37	0,84	-0,26
2023	-3,01	0,79	0,29	-1,15	0,72
2024	-3,49	0,9	0,08	2,06	0,44
2025	-3,31	0,89	-0,95	0,7	-0,02

➤ Les étapes de modélisation pour chaque station

KONGOUSI

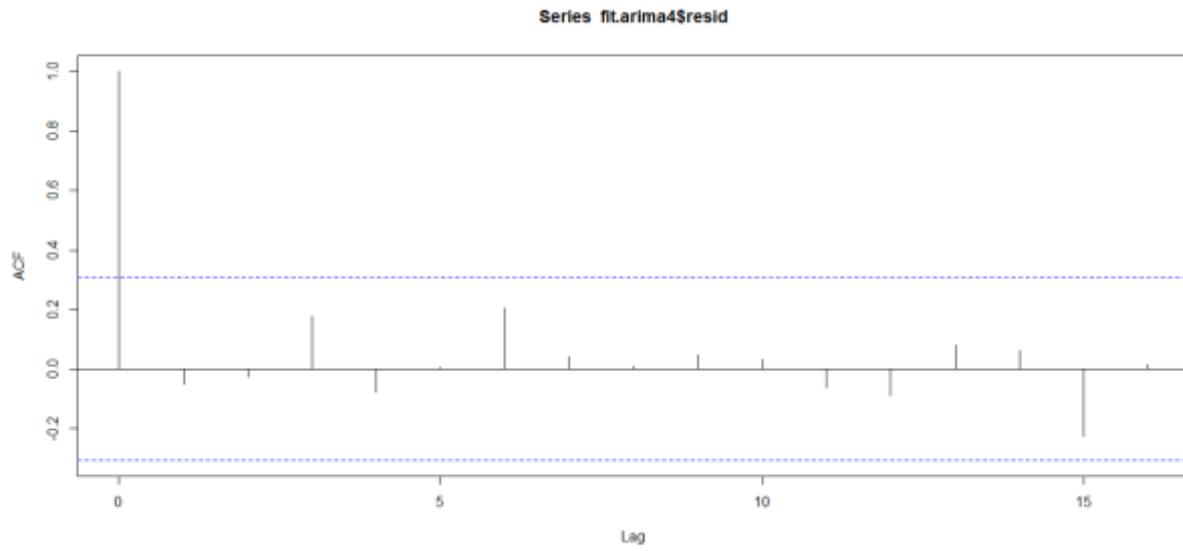
- Identification des tendances et repérage des effets saisonnalités



- Choix des modèles

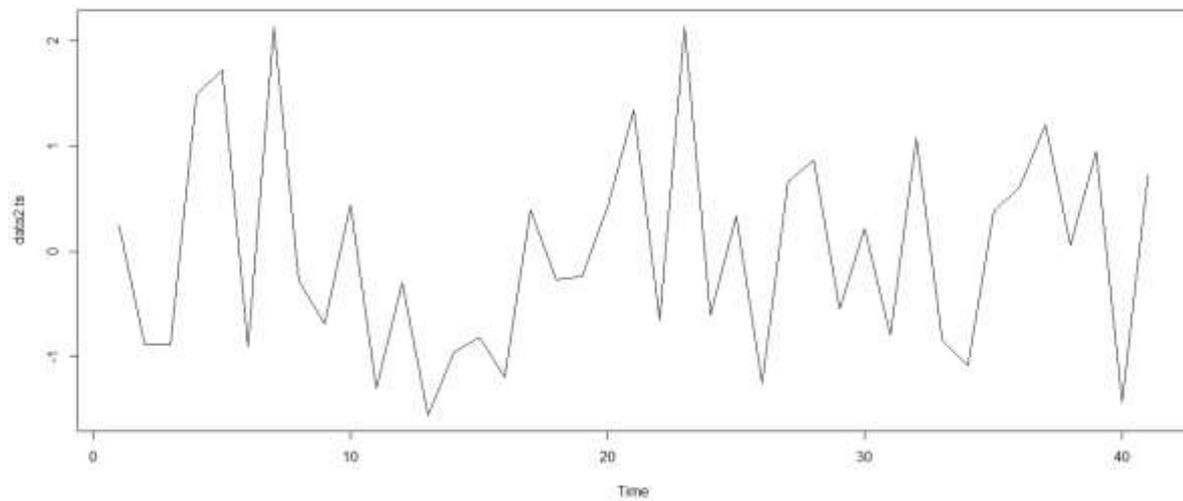
Modèle	AIC
arima4	111.46
arima4a	111.76
arima4b	126.37

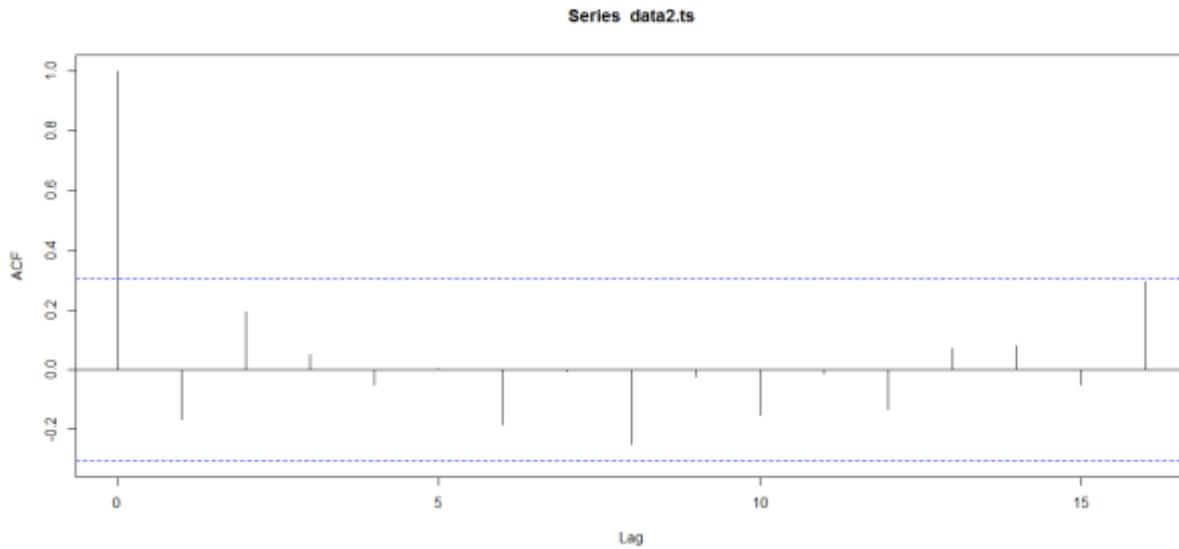
- Validation des modèles



BOURZANGA

- Identification des tendances et repérage des effets saisonnalités

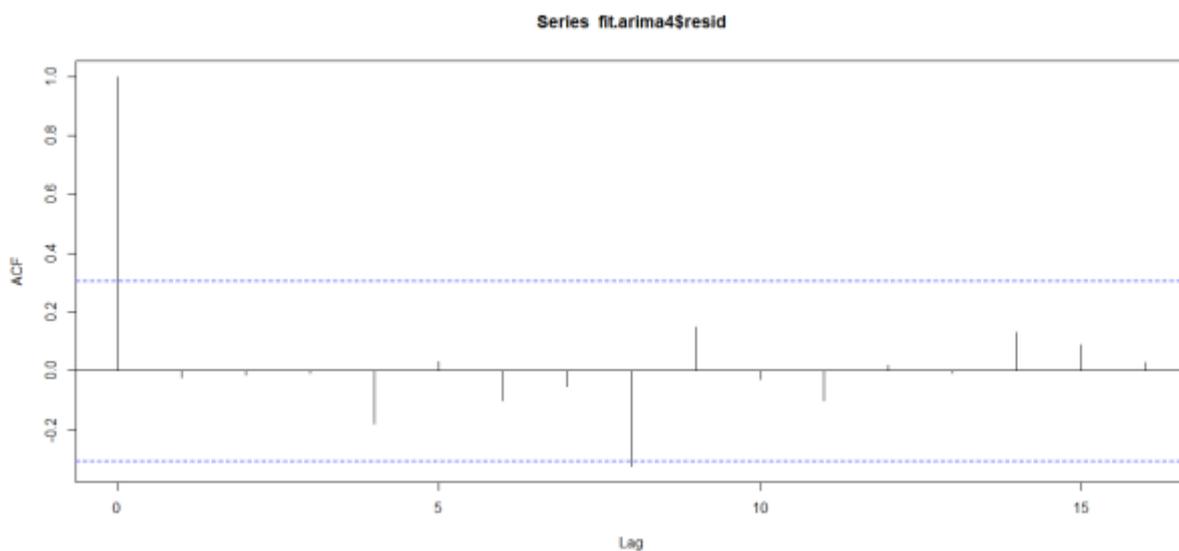




- Choix des modèles

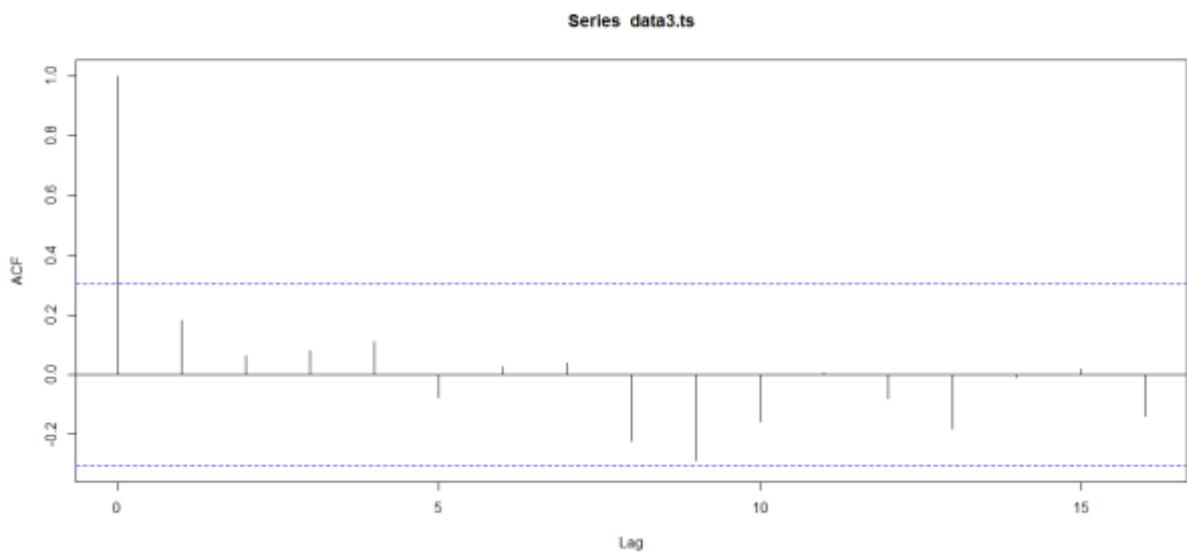
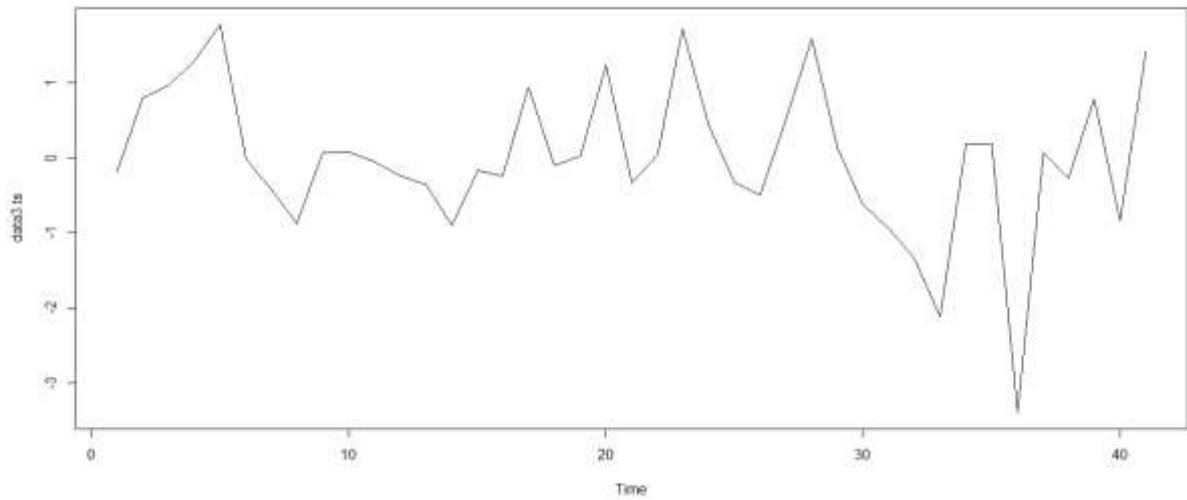
	AIC
arima4	109.74
arima4a	110.78
arima4b	128.42

- Validation des modèles



KAYA

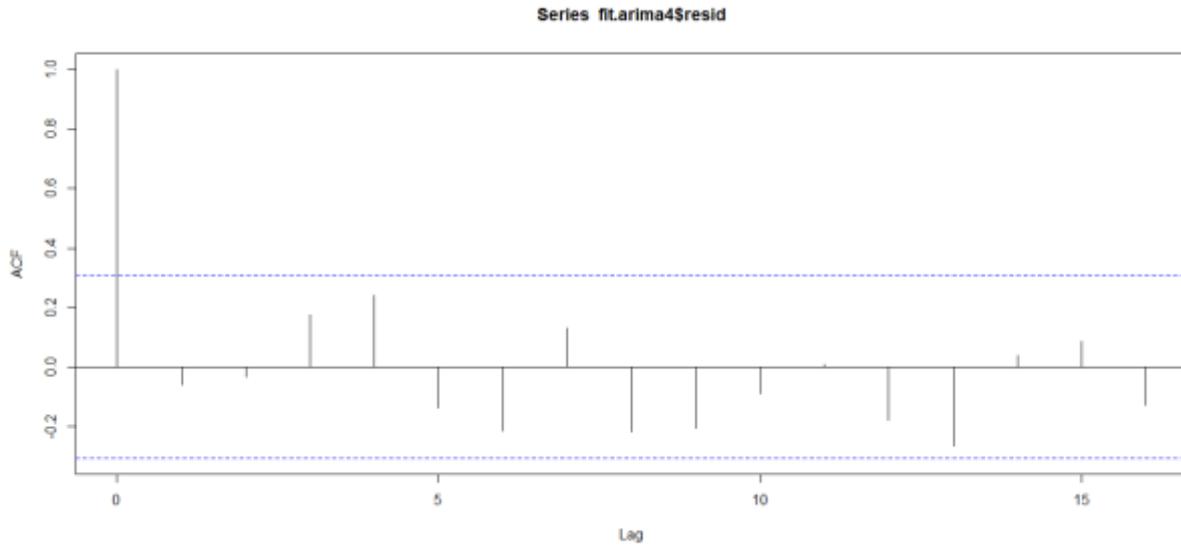
- Identification des tendances et repérage des effets saisonnalités



- Choix des modèles

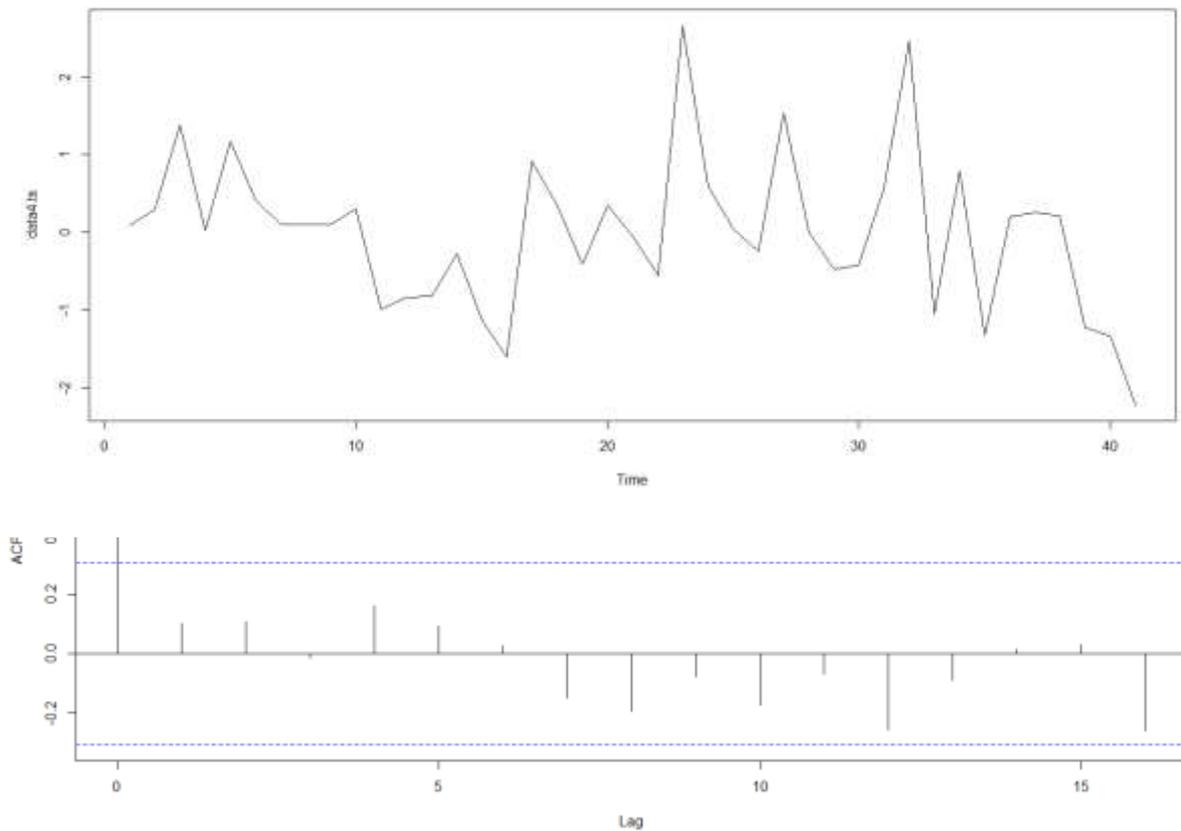
Modèle	AIC
arima4	99.94
arima4a	104.89
arima4b	111.3

- Validation des modèles

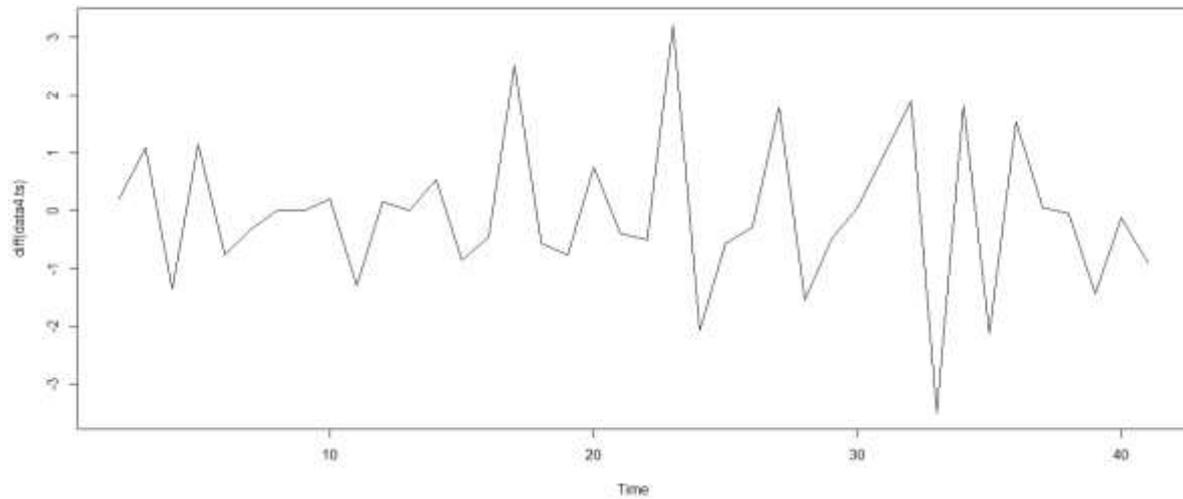


TOUGOURI

- Identification des tendances et repérage des effets saisonnalités



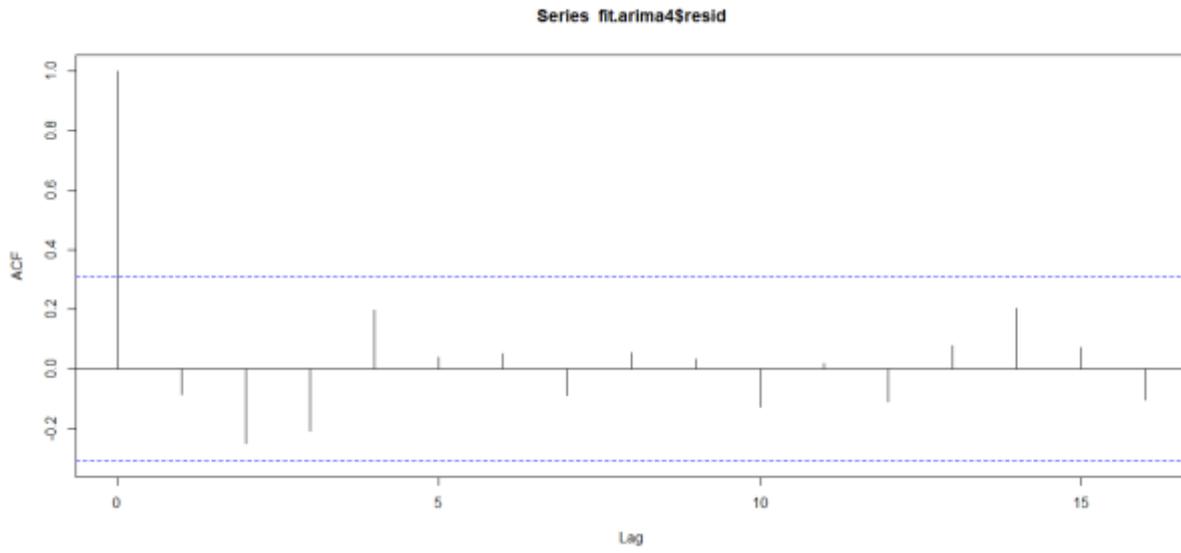
- Suppression des effets de saisonnalités



- Choix des modèles

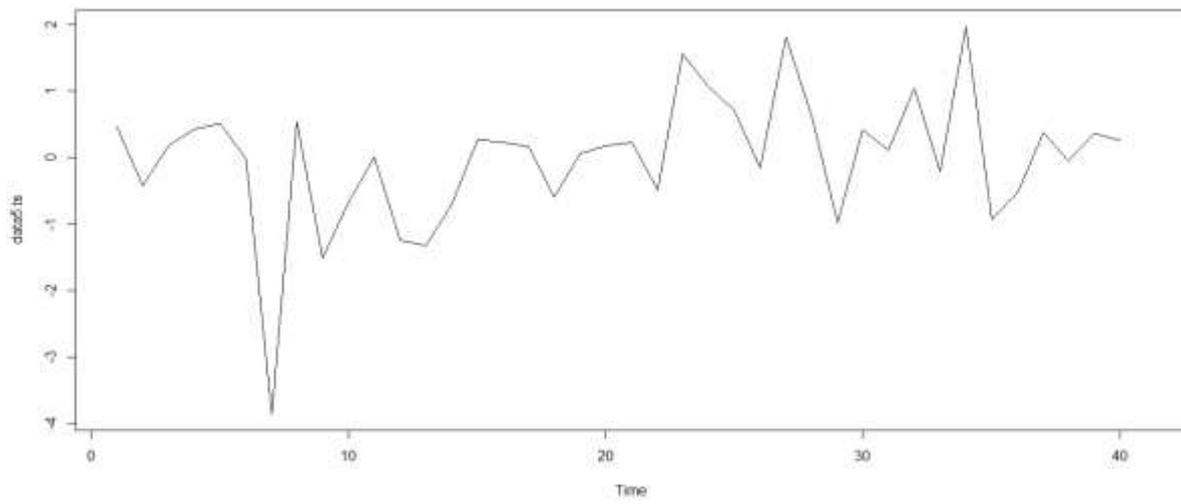
Modèle	AIC
arima4	114.16
arima4a	124.46
arima4b	149.3

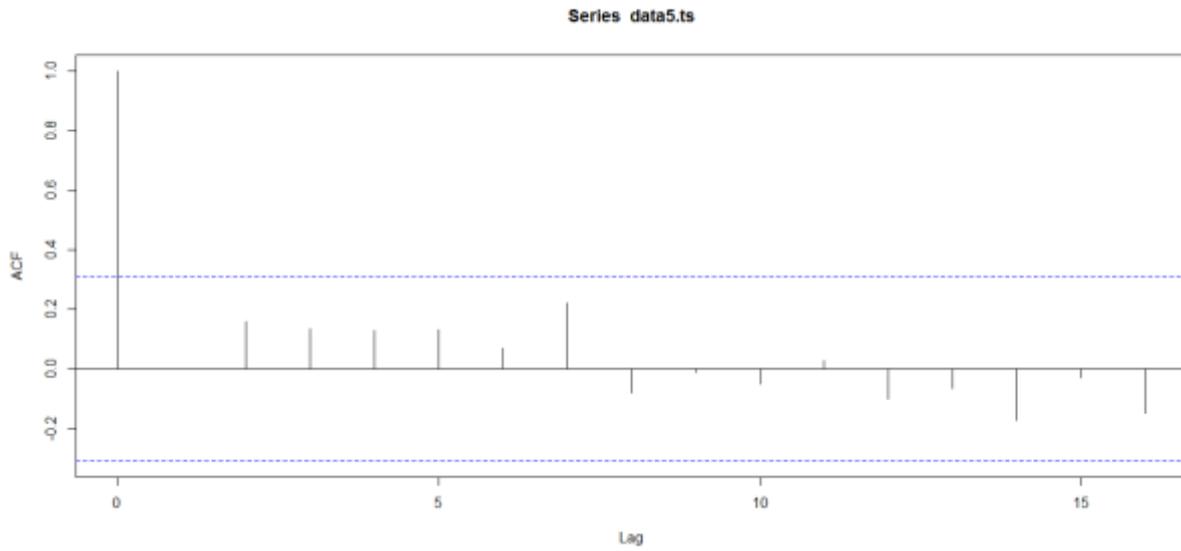
- Validation des modèles



BOGANDE

- Identification des tendances et repérage des effets saisonnalités

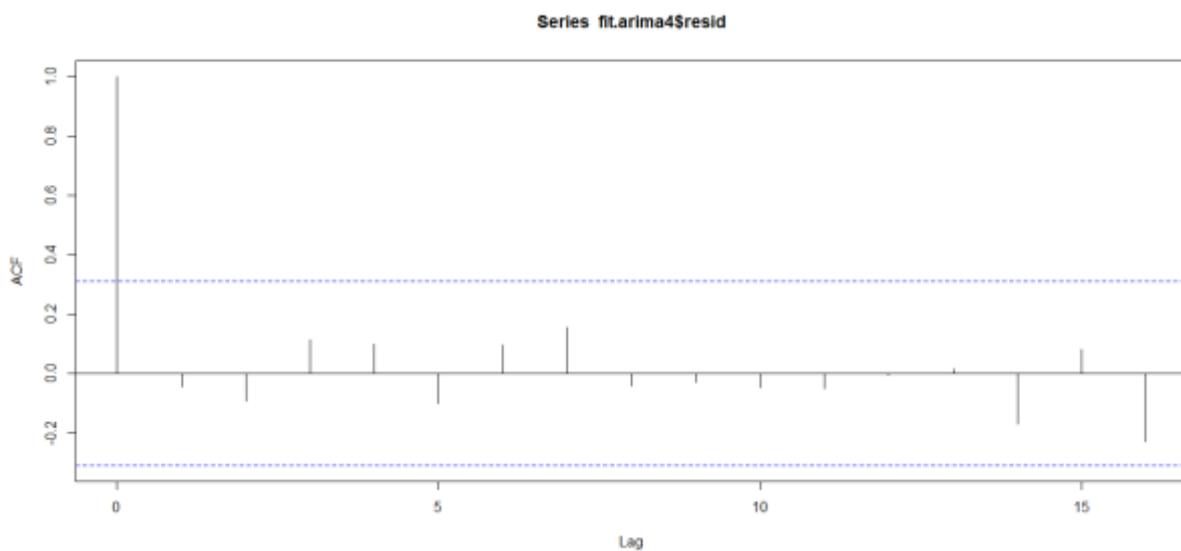




- Choix des modèles

Modèle	AIC
arima4	102.8
arima4a	105.68
arima4b	115.27

- Validation des modèles



Annexe 10: Les totaux pluviométriques annuels pour chaque station

Année	Kongoussi	Bourzanga	Kaya	Tougouri	Bogande
1972	492,4	538	582,2	560,0	652
1973	621,2	416	759,4	589,9	518
1974	861,3	416	788,3	752,0	608
1975	668,5	672	849,1	550,4	646
1976	564,5	697	935,6	720,1	657
1977	434,1	413	614,3	607,6	577
1978	787,9	742	539,8	561,3	580
1979	554,2	481	458,2	561,3	661
1980	610,4	437	627,9	561,3	354
1981	751,5	559	629,8	591,5	480
1982	528	370	607,4	399,8	582
1983	464,4	479	573,5	423,0	393
1984	413,8	343	552,4	424,7	382
1985	419,7	408	454,0	505,1	475
1986	547,1	423	586,4	378,3	621
1987	484,8	382	572,7	310,6	615
1988	822,5	554	785,5	682,1	605
1989	567,1	482	599,4	598,1	492
1990	447,3	486	620,4	485,6	590
1991	703,4	558	836,9	597,5	607
1992	637,5	656	556,1	538,4	616
1993	558,9	440	624,3	464,3	507
1994	922,2	742	925,5	941,0	815
1995	513,9	446	695,4	635,7	742
1996	643,2	547	558,2	553,2	687
1997	773,1	376	526,9	510,0	557
1998	775,7	583	709,6	774,7	853
1999	718,2	605	900,8	547,4	673
2000	476,9	452	639,4	476,4	434
2001	720,3	535	504,3	484,4	644
2002	594,9	425	448,5	628,9	598
2003	749	627	376,1	910,3	738
2004	494	420	236,6	392,5	550
2005	762,8	394	650,3	663,2	877
2006	425,3	552	650,3	350,2	441
2007	634,8	577	5,7	576,5	501
2008	497,7	641	629,0	585,0	638
2009	238,4	517	567,7	579,0	574
2010	513,5	614	757,7	366,5	636
2011	303,4	356	466,2	349,5	619
2012		589	870,8	217,5	

Annexe 11: Tableau de valeur de l'ACP pour la station de Bogande

Année	Pmens	P	P1	p2	P3	P4	Tmoy	Tmax	Tmin	AT	HR moy	HRmax	HR min	AHR
1998	71	6,27	3,42	1,92	0,25	0,25	29,0	35,4	22,6	12,8	44,9	61,5	28,3	33,2
1999	56	6,08	4,58	1,17	0,50	0,08	28,8	35,3	22,4	12,8	44,0	61,4	26,5	34,8
2000	36	3,92	2,83	1,08	0,08	0,08	28,8	35,4	22,3	13,1	43,0	60,7	25,4	35,4
2001	54	4,75	3,08	1,17	0,50	0,08	29,0	35,4	22,5	13,0	39,7	55,7	23,6	32,1
2002	50	3,75	2,17	1,08	0,42	0,08	29,0	35,2	22,7	12,5	41,8	58,0	25,6	32,4
2003	61	5,08	3,00	1,42	0,58	0,17	29,0	35,3	22,8	12,5	45,2	62,4	28,0	34,4
2004	46	3,92	2,17	1,67	0,17	0,00	29,2	35,3	23,1	12,2	42,7	60,0	25,3	34,7
2005	73	5,58	3,25	1,83	0,50	0,25	29,3	35,4	23,1	12,3	45,0	61,7	28,3	33,4
2006	37	4,50	3,25	1,08	0,25	0,00	29,1	35,6	22,7	12,9	43,5	59,5	27,5	31,9
2007	42	4,58	3,33	1,00	0,33	0,08	29,0	35,1	22,8	12,3	44,0	60,4	27,5	32,9
2008	53	4,67	3,08	1,25	0,50	0,08	28,9	34,6	23,3	11,2	44,8	60,8	28,8	32,0
2009	48	4,58	3,17	1,25	0,00	0,25	29,5	35,7	23,4	12,2	45,3	61,8	28,9	33,0
2010	53	5,67	3,92	1,92	0,42	0,08	29,0	35,3	22,8	12,6	45,4	61,7	29,1	32,7
2011	52	3,92	2,08	1,50	0,50	0,08	28,8	35,3	22,2	13,1	41,1	57,3	25,0	32,2