Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Cultures et Développement » (EDP)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Chaire Unesco Science, Technologie et Environnement (CUSTE)

Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi

Filière : Géographie et Gestion de l'Environnement

Spécialité : Géosciences de l'Environnement et Aménagement de l'Espace

N°…….d'enregistrement/EDP/FLASH/UAC

VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN DE LA SOTA A l'EXUTOIRE DE COUBERI (BENIN)

Présentée par

Soufouyane ZAKARI

Sous la direction de :

Dr Brice H. A. TENTE

Maître de Conférences des Universités du CAMES

DGAT/FLASH/UAC

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

Président	:	Benoît N'BESSA, Professeur Emérite, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Rapporteur	:	Brice Agossou Hugues TENTE, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Examinateur	:	Tanga Pierre ZOUNGRANA, Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou (Burkina-Faso)
Examinateur	:	Cossi Jean HOUNDAGBA, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Examinateur	:	Edinam KOLA, Maître de Conférences, Université de Lomé (Togo)

Soutenue publiquement le 16/12/2015

Mention : Très Honorable avec les félicitations du Jury à l'unanimité

SOMMAIRE

DEDICACE 5
REMERCIEMENTS 6
RESUME 8
ABSTRACT 9
INTRODUCTION GENERALE 10
PREMIERE PARTIE : CADRES METHODOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE 20
CHAPITRE 1 : CADRE METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE 21
CHAPITRE 2 : CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE 47
DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUES HYDROCLIMATIQUE ET D'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 72
CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 73
CHAPITRE 4 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 93
TROISIEME PARTIE : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DES ESSENCES FOURRAGERES ET VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS 114
CHAPITRE 5 : IMPACT DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DE QUATRE ESPECES FOURRAGERES DU BVS 115
CHAPITRE 6 : EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 138
CONCLUSION GENERALE 154
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 159
ANNEXES 175
LISTE DES FIGURES 194
LISTE DES TABLEAUX 196
LISTE DES PLANCHES 197
TABLE DES MATIERES 198

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	:	Analyse en Composantes Principales
AGNPS	:	Agricultural Non-Point-Source Pollution Model
AMMA	:	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
ASECNA	:	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
AUC	:	Area Under the Curve
AVHRR	:	Advanced Very High-Resolution Radiometer
BVS	:	Bassin Versant de la Sota
CARDER	:	Centre d'Action Régional pour le Développement Rural
CCCMA	:	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis
CCNUCC	:	Convention Cadre des Nations-Unies pour les Changements Climatiques
CENATEL	:	Centre National de Télédétection et de suivi écologique
CSIRO	:	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DG-Eau	:	Direction Générale de l'Eau
DH	:	Direction de l'Hydraulique
ETP	:	Evapotranspiration Potentielle
FAO	:	Food and Alimentation Organization
FIT	:	Front Inter-Tropical
GIEC	:	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS	:	Global Positioning System
HadCM3	:	Hadley Centre for Coupled Model version 3
INSAE	:	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IPCC	:	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	:	Institut de Recherche pour le Développement
LACEEDE	:	Laboratoire Pierre Pagney, Climat, Eau, Ecosystème et Développement
LCM	:	Land Change Modeler
MAEP	:	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MCG	:	Modèles de la Circulation Générale
MEPN	:	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
OBEMINES	:	Office Béninois des Mines
ONG	:	Organisation Non Gouvernementale
ONU	:	Organisation des Nations Unies
ORSTOM	:	Office de Recherche Scientifique et Technologique d'Outre-Mer

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
ROC : Relative Operating Characteristics
SCDA : Secteur Communal pour le Développement Agricole
SIG : Systèmes d'Information Géographique
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
SWAT : Soil and Water Assessment Tool
TM : Thematic Mapper
UBT : Unité de Bovin Tropicale
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
USGS : United States Geological Survey
ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

DEDICACE

A ma famille

REMERCIEMENTS

Au terme de cette recherche, nous tenons, à témoigner en premier lieu toute notre reconnaissance à notre directeur de thèse, le Docteur Hugues Agossou Brice TENTE, pour l'intérêt porté à ce thème, pour sa disponibilité, pour ses apports scientifiques et ses qualités humaines. Il a été d'un grand apport dans la finalisation de la présente thèse. Nos remerciements vont aussi à l'endroit de tous les enseignants de l'Ecole Doctorale Pluridisciplinaire de la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (EDP/FLASH) et ceux du Département de Géographie et Aménagement du Territoire pour la formation qu'ils nous ont donnée. Notre gratitude va en particulier au Professeur Michel BOKO ancien Directeur de l'EDP qui a dirigé notre mémoire du diplôme d'Etudes Approfondies (DEA).

- Nos remerciements vont également à l'endroit des autorités de l'Université d'Abomey-Calavi qui ont mis au point le Programme Fonds Compétitifs de Recherche (PFCR) de l'Université d'Abomey-Calavi qui a financé le projet Modélisation de la Dynamique des Parcours naturels dans le Contexte des Changements Climatiques (MDP3C) qui nous a appuyé financièrement dans la réalisation de la présente thèse.
- Nous avons une pensée particulière pour Messieurs le Professeur Benoît N'BESSA Coordonnateur du projet MDP3C, le Professeur Etienne DOMINGO, le Professeur Fulgence AFOUDA, le Docteur Omer THOMAS, le Docteur Cossi Jean HOUNDAGBA et au Docteur Eric TCHIBOZO pour leurs encouragements et conseils.
- Notre gratitude va aussi au Docteur Ibouraïma YABI pour sa disponibilité et conseils. Notre profonde reconnaissance au Docteur Ismaïla TOKO, au Docteur Ousséni AROUNA, au Docteur Mama DJAOUGA et au Docteur Djafarou ABDOULAYE qui nous ont apporté leur soutien, leur collaboration et leur dévouement pour l'achèvement de ce travail.
- Nous exprimons également notre reconnaissance au Docteur Euloge OUGOUWALE, au Docteur Erneste AMOUSSOU, au Docteur Henri TOTIN, au Docteur Expedit VISSIN, au Docteur Cyr ETENE , au Docteur Dégla Hervé KOUMASSI, tous chercheurs au Laboratoire Pierre PAGNEY ≪ Climat, Eau,

Ecosystèmes et Développement ≫ pour leur disponibilité, leurs conseils et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

- A tous les assistants du Laboratoire de Cartographie (LaCarto) notamment Drs Housérou DJIBRIL, Drs Abib O. SABI, Drs Nourou TOKO, messieurs Yaya Issifou MOUMOUNI, Ismaël MAZO, Gildas K. S. MENSAH nous disons merci pour leur appui dans le traitement de certaines de nos données.
- Nous disons également merci à tous les camarades de promotion notamment Dr Imorou O. BARRE, Dr Gervais ATCHADE et Rachel ARAYE pour leur soutien.
- Nous n'oublierons jamais tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.
- Nous ne saurions terminer sans exprimer une pensée sympathique à tous les frères, sœurs, cousins, cousines, oncles, tantes, parents, amis et amies pour leur compassion et les sacrifices consentis à notre endroit pour l'aboutissement de ce travail.

RESUME

L'évaluation de la vulnérabilité des systèmes humains et biophysiques occupent place prépondérante dans les travaux de tous les chercheurs qui travaillent sur la variabilité et les changements climatiques. Malgré cet intérêt soutenu pour les études de vulnérabilité aux changements climatiques, l'impact potentiel des changements climatiques sur les écosystèmes agropastoraux est encore peu documenté notamment dans une région comme le bassin de la Sota sujet à de fortes mutations socio-environnementales (poussée démographique élevée, forte variabilité hydroclimatique, recul du couvert végétal). Ce bassin versant appartient à la région du Bénin qui abrite le plus important cheptel de ruminants nourris essentiellement de pâturages naturels. C'est l'objectif global de la présente recherche qui est d'étudier la vulnérabilité des parcours naturels du bassin versant de la Sota à l'évolution du climat. Pour atteindre cet objectif, plusieurs approches et outils méthodologiques ont été mobilisés. Il s'agit, de l'analyse de dynamique hydroclimatique et ses impacts potentiels sur la distribution des espèces fourragères, de même que la dynamique de l'occupation des terres à partir des données hydroclimatologiques et de l'imagerie satellitaire. Les méthodes de statistique descriptive, de modélisation de la niche écologique ont été utilisées. Les résultats obtenus permettent de noter que le bassin versant de la Sota est sujette à une variabilité hydroclimatique qui se caractérise par une succession de périodes sèches et périodes humides. L'analyse de la chronique des précipitations annuelles (1965-2010) a montré que les précipitations annuelles ont connu une rupture de stationnarité en 1970 avec un déficit pluviométrique de 6,76 %. Sur le plan thermométrique, il a été noté que sur le bassin de la Sota, les températures (minimales et maximales) ont connu une hausse. Sur le plan hydrologique, le bassin versant de la Sota a également été marqué par une importante variabilité. Les fluctuations enregistrées sur la série hydrométrique sont comparables à celles qu'a connues la série pluviométrique annuelle. Une rupture de stationnarité a été notée sur les débits de la Sota à Coubéri en 1970. Le déficit d'écoulement qui en a résulté est de 33,75 % soit environ cinq fois le déficit pluviométrique.
Par ailleurs, les résultats ont montré que la dynamique l'occupation des terres est marquée par une régression des superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses sèches avec une vitesse de régression de -413 km²/an. Par contre, les surfaces cultivées, des sols dénudés et des agglomérations ont connu une augmentation de leur superficie avec une vitesse de 470,71 km²/an. De même, l'analyse de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution des espèces fourragères *Khaya senegalensis*, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri* à l'horizon 2050 dans le bassin de la Sota à l'aide des modèles climatiques CCCMA, CSIRO et HadCM3 a permis de noter que pour le modèle HadCM3, les projections climatiques indiquent une diminution très sensible des habitats actuellement très favorables à ces espèces. Par contre pour les autres modèles, on note une variation moins importante des différents habitats de ces espèces à l'horizon 2050.
Enfin, la spatialisation des niveaux de vulnérabilité des parcours naturels du bassin versant de la Sota aux changements climatiques permet de noter que les secteurs Nord et Ouest seront plus négativement impactés par les changements climatiques. Il serait nécessaire de prendre en compte les herbacées dans les prochaines recherches sur la vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques.

Mots-clés : parcours naturels, bassin versant de la Sota, occupation des terres, dynamique hydroclimatique, vulnérabilité.

ABSTRACT

The evaluation of the vulnerability of the human systems and biophysics occupy dominating place in work of all the researchers who work on the climatic variability and changes. In spite of this interest supported for the studies of vulnerability to the climatic changes, the potential impact of the climatic changes on the agropastoral ecosystems is still little documented in particular in an area like the catchment of the Sota prone to strong socio-environmental changes (high population increase, strong hydroclimatic variability, retreat of vegetable cover).This catchment area belongs to the area of Benin which shelters the most significant livestock of primarily nourished ruminants of natural pastures. The global objective of this research is to study the vulnerability of the natural courses of the catchment area of Sota to the evolution of the climate. To achieve this goal, several methodological approaches and tools were mobilized. The hydroclimatic variability and its potential impacts on the distribution of forage species, as well as the dynamics of land use were analyzed with hydroclimatological data and satellite imagery. Descriptive statistics methods, modeling of the ecological niche were used. The results obtained noting that the Sota watershed is subject to hydroclimatic variability that is characterized by a succession of dry periods and wet periods. The analysis of chronic annual precipitation (1965-2010) showed that annual rainfall has been a breach of stationarity in 1970 with a rainfall deficit of 6.76 %. The resultats show that temperatures (minimum and maximum) were up. On the thermometric level, it was noted that on the catchment of Sota, the temperatures (minimal and maximum) knew a rise. On the hydrological level, the catchment area of Sota was also marked by a significant variability. The fluctuations recorded on the hydrometric series are comparable with those which knew the annual pluviometric series. A rupture of stationnarity was noted on the flows of Sota with Coubéri in 1970. The resulting deficit is 33.75 % or about five times the rainfall deficit.

Furthermore, the results showed that the dynamics of land tenure is marked by a decline in the woodland areas, forests galleries and dense dry forests with regression speed -413 km²/year. As against the cultivated areas, bare soil and cities have experienced an increase in their surface area with a speed of 470.71 km²/year.

Similarly, analysis of the impact of climate dynamics on the distribution of forage species *Khaya senegalensis, Afzelia africana, Pterocarpus erinaceus* and *Daniella oliveri* 2050 in the basin of the Sota using CCCMA climate model, HadCM3 and CSIRO allowed to note that for the HadCM3 model climate projections indicate a substantial reduction in the currently very favorable habitat for these species. As against the other models, there is a smaller variation of the different habitats of these species in 2050.

Finally, vulnerability assessment rangeland watershed Sota climate change can be noted that the northern and western areas will be most adversely affected by climate change. It would be necessary to take into account the herbaceous ones in next research on the vulnerability of the natural courses to the climatic changes.

Key words : natural courses, catchment area of Sota, occupation of the grounds, hydroclimatic dynamics, vulnerability.

INTRODUCTION GENERALE

Le Changement Climatique à l'échelle planétaire est devenu désormais une réalité qui fait partie du quotidien du citoyen et des instances politiques aussi bien au plan international que national. Cette prise de conscience internationale et cette reconnaissance mondiale ont été confirmées depuis le Sommet de la terre à Rio en 1992 (GIZ, 2011). En effet, les travaux du l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ont permis de mettre au point les bases scientifiques des changements climatiques et leurs conséquences socio-économiques en termes d'adaptation, de vulnérabilité ainsi qu'en termes d'atténuation.

D'après différents rapports de l'IPCC (2007 et 2014), l'Afrique demeure l'un des continents les plus vulnérables à la variabilité et aux changements climatiques à cause des stress multiples qu'il connaît et dont la capacité de réponse et d'adaptation demeure faible. Les changements climatiques constituent aujourd'hui une menace potentiellement majeure pour l'environnement et le développement durable (MEPN, 2008).

Aucun écosystème ou secteur de l'économie ne restera insensible à la variabilité et aux changements climatiques. En Afrique de l'Ouest, les sécheresses des années 1970 - 80 ont fortement affecté les couverts végétaux, décimé les peuplements ligneux et réduit les productions végétales (Hiernaux *et al*. 2009 ; Miehe 2010). Ces changements se sont répercutés sur les sols et les systèmes hydriques (Diop *et al.*, 2004 ; Gardelle *et al*., 2010 ; Ramarohetra, 2010). Au Bénin, la plupart des écosystèmes des différentes régions agroécologiques sont aujourd'hui marqués par une dégradation du fait de la forte variabilité climatique associée à une plus grande fréquence des phénomènes extrêmes au cours des dernières décennies (Boko, 1988 ; Afouda, 1990 ; Houndénou, 1999 ; Ogouwalé, 2006 ; Issa, 2012). Le secteur agricole béninois (productions végétale et élevage) est un des secteurs de l'économie les plus vulnérables aux changements climatiques. L'élevage, seconde activité plus importante du secteur agricole, est pratiqué selon un mode traditionnel caractérisé par une grande mobilité des bétails à la recherche de l'alimentation et de l'abreuvement (MAEP, 2011). C'est un élevage majoritairement extensif et transhumant donc très dépendant des ressources naturelles (pâturages

naturels, eau). Le cheptel ruminant tire l'essentiel de sa ration des pâturages naturels et des résidus de récoltes.

La vulnérabilité aux changements climatiques de l'élevage extensif tient justement à sa forte dépendance aux ressources naturelles et climatiques. Déjà les perturbations du début des années 1970 ont fortement touché le secteur de l'élevage au Bénin. La baisse de la pluviométrie a entraîné une extension des surfaces cultivées au détriment des espaces pastoraux, les activités agricoles se sont concentrées autour des plans d'eau, objets de convoitise pour les différentes formes d'utilisation des terres (LECREDE, 1995). En 1983, le sévère déficit pluviométrique qu'a connu le Nord–Bénin y a provoqué la perte d'un tiers (1/3) du cheptel (Gounou, 1985).

Le bassin versant de la Sota est localisé au Nord-Est du Bénin, région sujette à d'importantes mutations environnementales. En effet, ce bassin versant a subi une variabilité hydroclimatique se traduisant, globalement depuis 1970, par un déficit pluviométrique de l'ordre 7 % et un déficit d'écoulement encore plus prononcé d'environ 35 % (Zakari *et al.*, 2015). La variabilité hydroclimatique observée dans le bassin versant s'est traduite par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements extrêmes avec notamment une multiplication des risques hydroclimatiques dont les plus importants dans le bassin versant sont l'inondation et la sécheresse (Koumassi, 2014).

Par ailleurs, ces dernières années, l'élevage y a connu un essor remarquable en raison de l'amélioration des conditions sanitaires des animaux notamment le gros bétail. Ce qui a entraîné une augmentation de la pression sur les pâturages. A cette situation, il faut ajouter l'accroissement rapide des superficies cultivées, l'exploitation abusive des ressources végétales qui engendrent la raréfaction voire la disparition de certaines espèces végétales (Vodounnon, 2010).

En somme, le développement de l'élevage et de l'agriculture, surtout l'accroissement du cheptel et l'extension des domaines exploités ont engendré une dégradation des ressources naturelles en particulier des formations végétales (Djenontin *et al*., 2009). De ce fait, les performances de production des troupeaux bovins en sont affectées et sont demeurées faibles à cause de la faible valeur fourragère des pâturages naturels (Sinsin, 2000). L'offre fourragère des pâturages naturels est de plus en plus réduite avec

la dégradation des formations végétales combinée aux changements climatiques dont les effets sont observés depuis bientôt trois décennies.

En résumé, les parcours naturels du bassin versant de la Sota sont, plus ou moins, marqués par l'ampleur de l'impact des diverses activités humaines. Il s'agit surtout du surpâturage et de l'extension des cultures pluviales qui dénudent le sol et accélèrent ainsi son érosion. La sécheresse climatique, qu'a connue la région, a fortement perturbé l'équilibre des écosystèmes.

Selon les résultats de plusieurs travaux scientifiques, de fortes tendances de modification du climat futur sont attendues aux plans mondial et régional. Au Bénin, les recherches de plusieurs auteurs (Sintondji, 2005 ; Paeth *et al*., 2005 ; Giertz *et al*., 2006 ; Hiepe, 2008) prédisent une baisse de la pluviométrie annuelle totale dans les prochaines décennies dans différentes régions du Bénin et notamment dans le Nord du pays.

Par ailleurs, selon l'IPCC (2001), les pâturages font partir des trois grands domaines affectés par les changements climatiques au niveau agricole, avec une modification des zones propices à l'élevage, une diminution de la valeur nutritive du fourrage (rapport C/N élevé), une modification de la composition des espèces fourragères (IPCC, 2001).

Face à tous ces constats la question générale qui se pose peut être ainsi formulée :

- de quelle manière les parcours naturels du bassin versant de la Sota vont-ils se comporter face à l'évolution aux changements climatiques ?

Cette question générale peut être déclinée en trois autres questions spécifiques :

- quelles sont les évolutions hydroclimatiques majeures et les tendances évolutives de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota ?
- quel peut être l'impact des changements climatiques sur la distribution des espèces fourragères ligneuses du bassin versant de la Sota ?
- quelle est la répartition spatiale de la vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques ?

C'est pour tenter de répondre à ces questions que le sujet de la présente thèse a été choisi. En effet, dans un contexte où les changements climatiques apparaissent incontournables, il importe au pays de pouvoir s'y préparer adéquatement. Toutefois, l'impact potentiel des changements climatiques sur les écosystèmes pastoraux est encore peu documenté.

Il apparaît donc essentiel d'approfondir les connaissances de manière à mieux outiller les décideurs pour faire face à ces changements inévitables.

Hypothèses de travail

L'hypothèse principale qui fonde la présente recherche est : les parcours naturels du bassin versant de la Sota, résultat d'une longue évolution des conditions bioclimatiques et anthropiques sont sensibles à l'évolution rapide du climat actuel. Cette hypothèse principale est subdivisée en hypothèses secondaires qui sont :

- **H_1** : le bassin versant de la Sota est sujet à une double dynamique hydroclimatique et d'occupation des terres globalement négative ;
- **H_2** : la distribution des espèces fourragères ligneuses du bassin versant de la Sota est influencée par les changements climatiques ;
- **H_3** : la vulnérabilité des parcours naturels du bassin de la Sota aux changements climatiques est inégale au plan spatial.

Les objectifs de la présente thèse sont :

Objectifs de recherche

L'objectif global de la présente recherche est d'étudier la vulnérabilité des parcours naturels du bassin versant de la Sota à l'évolution du climat.
De façon spécifique, il s'est agi :

- **OS_1** : de caractériser les dynamiques hydroclimatique et d'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota ;
- **OS_2** : d'analyser l'impact des changements climatiques sur la distribution de quelques espèces fourragères ligneuses du bassin versant de la Sota ;
- **OS_3** : de spatialiser les niveaux de vulnérabilité des parcours naturels du bassin de la Sota aux changements climatiques.

Clarification des concepts

Un certain nombre de concepts et notions ont été définis afin de faciliter la compréhension du document.

- **Adaptation**

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) définit l'adaptation comme l'ajustement des systèmes naturels ou anthropiques en réponse à des stimuli climatiques actuels ou attendus qui limitent les dommages et favorise le développement d'opportunités (IPCC, 2001). Dans les systèmes naturels, l'adaptation est réactive, tandis que dans les systèmes humains, elle peut également se faire par anticipation (GIEC, 2001). Sa mise en œuvre peut s'envisager de différentes façons qui ont des implications en termes de décisions publiques (Fankhauser *et al*., 1999 ; Smit *et al*., 2002). Dans ce cas, l'adaptation peut être :

- autonome ou sous l'influence d'une politique, ce qui implique alors une intervention de l'Etat en termes d'incitation ou de régulation ;
- proactive par anticipation (vision stratégique) ou en réponse tactique à un choc ;
- appliquer à différentes échelles territoriales (parcelle, exploitation, région, Etat) n'induisant pas les mêmes niveaux de responsabilité et de mobilisation des acteurs (exploitants, coopératives, collectivités, états et agences).

Dans le cadre de la présente étude, la définition proposée par le GIEC précédemment annoncée plus haut paraît plus indiquée.

- **Modèle**

C'est une représentation idéalisée de la réalité en vue d'une démonstration (Toko Mouhamadou, 2014).

- **Modèle climatique**

De manière générale, un modèle climatique est un programme d'ordinateur essentiellement constitué d'équations mathématiques. Ces équations décrivent, de manière quantitative, comment la température de l'atmosphère, la pression de l'air, les vents, la vapeur d'eau, les nuages et les précipitations répondent au réchauffement de la surface de la terre et de l'atmosphère suite à l'addition de gaz à effet de serre résultant de l'activité humaine qui limite la capacité de l'atmosphère à se refroidir (Spencer, 2009).

- **Niche écologique**

La niche est ce qui décrit l'écologie d'une espèce, ce qui peut signifier son rôle dans l'écosystème, son habitat (Pocheville, 2010). Hutchinson (1978) définit la niche d'une espèce comme le volume, dans l'espace des variables environnementales, où l'espèce peut survivre indéfiniment (niche fondamentale), ou bien le volume, restreint du fait des interactions avec les compétiteurs présents, où l'espèce survit effectivement (niche réalisée). La niche écologique est alors l'ensemble des conditions environnementales telles qu'une espèce donnée peut former des populations viables.

- **Occupation des terres**

C'est la couverture biophysique de la surface de la terre incluant la végétation, les cours et plans d'eau, les champs, les jachères et les installations humaines à un instant « t ».
L'occupation du sol peut être donc succinctement définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées (Arouna, 2012).

- **Parcours naturels**

C'est l'ensemble des zones de végétation spontanée et post-culturale qui constituent les aires de parcours du bétail (Ludwig et Bastin, 2008 ; Djenontin, 2010). Dans le bassin de la Sota, les parcours naturels sont principalement constitués des formations végétales naturelles (forêts et savanes essentiellement).

- **Pastoralisme**

Le pastoralisme désigne l'ensemble des pratiques d'élevage et d'organisation du territoire liées à l'utilisation des espaces naturels pour le pâturage des troupeaux (LPP, 2005). Il est également une pratique qui consiste à assurer l'alimentation des animaux grâce à l'exploitation itinérante des ressources pastorales (Niamir, 1999).
Le pastoralisme est alors un ensemble de stratégies d'élevage fondé sur une adaptation permanente aux facteurs environnementaux très incertains notamment le climat qui conditionne la disponibilité du pâturage.

- **Résilience**

La résilience est définie comme la capacité d'un système à retrouver ses fonctionnalités suite à l'occurrence d'un choc (Holling 1973). Pour Pimm (1984), cette notion peut être définie comme la rapidité d'un système à retrouver un état d'équilibre pouvant être différent de l'état initial suite à une perturbation. Notons toutefois que certains auteurs utilisent de manière indifférente les notions de résilience et de vulnérabilité.

- **Scénario climatique**

Un scénario est une description vraisemblable, cohérente et intrinsèquement homogène d'un état futur du globe (GIEC, 2001). Ils sont utilisés pour l'évaluation de l'incidence des changements climatiques ou pour des mesures d'adaptation ou de vulnérabilités afin d'avoir des visions différentes des conditions susceptibles d'influer sur un système ou sur une activité donnée. On distingue les scénarios climatiques, qui décrivent le facteur de forçage et les scénarios non climatiques, qui définissent le contexte socio-économique et environnemental dans lequel ce forçage survient. Trois grandes catégories de scénarios climatiques sont utilisées dans les évaluations d'incidences : les scénarios incrémentiels, les scénarios par analogies et les scénarios basés sur les modèles climatiques. Les scénarios les plus courants utilisent les résultats des modèles de la circulation générale (MCG) (GIEC, 2001). Selon le GIEC (2000), on distingue 4 grandes familles de scénarios (famille A1, A2, B1 et B2) subdivisés en 6 groupes de scénarios et en 40 scénarios.

- **Transhumance**

La transhumance se définit comme un mouvement pendulaire et saisonnier des animaux sous le gardiennage de bouviers, suivant des itinéraires précis en vue de l'exploitation des ressources pastorales. Ce mouvement peut s'étendre à un territoire national ou à une région. Elle se distingue du nomadisme qui se caractérise par des déplacements plus aléatoires et suivis par toute la famille de l'éleveur (Djenontin, 2010). Pour Bremond (2012), c'est un déplacement régulier des troupeaux entre des points fixes afin d'exploiter la disponibilité saisonnière des pâturages.

- **Variabilité et changement climatique**

L'IPCC (2007) définit la variabilité climatique comme des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels, alors que la notion de changement climatique se réfère à un changement du climat dû à l'activité humaine directe ou indirecte, activité altérant la composition de l'atmosphère globale et qui vient s'ajouter à la variabilité naturelle observée sur une échelle de temps comparable (CCNUCC, 2002). Selon le GIEC (2001), le changement climatique se réfère à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistante sur une longue période de temps (centenaire).

- **Vulnérabilité**

D'après le GIEC (2001), la vulnérabilité concept central à l'adaptation est « le degré selon lequel un système est susceptible d'être affecté négativement par les effets du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les extrêmes) ou est incapable d'y faire face ». La vulnérabilité dépend de l'exposition, de la sensibilité et de la capacité adaptative. Une forte exposition ou sensibilité et une faible capacité adaptative entrainent une forte vulnérabilité.

Un système vulnérable peut être un écosystème, un groupe social, ou un système socioécologique. On peut donc parler de vulnérabilité (ou de résilience) écologique, sociale ou socio-écologique.

La résilience et la vulnérabilité sont deux notions différentes mais avec des liens forts qui conduisent quelquefois à leur utilisation de façon interchangeable (la résilience étant assimilée au symétrique de la vulnérabilité ou à la capacité adaptive).

Au sens général, la vulnérabilité est définie comme une prédisposition d'un système à souffrir d'un choc ou d'un stress externe provoqué par des aléas climatiques, des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques (Touré *et al*., 2010). Cette définition renvoie à trois indicateurs de la vulnérabilité à savoir : la sensibilité, la capacité d'adaptation et l'exposition. La sensibilité est le degré selon lequel une communauté est affectée par le stress climatique et cela dépend des moyens d'existence et du système de production. La capacité d'adaptation s'entrevoie à travers les stratégies d'adaptations

mise en œuvre par les socio-systèmes face à des dommages potentiels. Lesquels stratégies d'adaptation ne sont pas exclusives les unes des autres. Elles sont toujours combinées entres elles de manières à accroître leurs effets et impacts sur les systèmes de production. L'exposition aux variations climatiques est en grande partie une question de localisation géographique.

La vulnérabilité peut être analysée sous deux approches différentes : l'approche d'analyse de la vulnérabilité biophysique et celle de la vulnérabilité sociale.

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

Organisation du document

Le document est articulé en six chapitres réunis en trois parties.

La première partie constituée des chapitres I et II présente les cadres méthodologique et géographique de la recherche. Le chapitre I est consacré au cadre méthodologique de recherche. Ici sont présentés les données, les méthodes de collecte et de traitement et d'analyse de ces données. Le chapitre deuxième présente le cadre géographique de l'étude c'est-à-dire le bassin de la Sota à travers son cadre physique et humain.

La deuxième partie qui réunit les chapitres III et IV analyse les dynamiques hydroclimatique et d'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota. Le chapitre III traite de la variabilité et des scénarios climatiques. Le chapitre IV présente les résultats relatifs à la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota.

La troisième partie quant à elle consacrée aux incidences de la dynamique climatique sur la distribution des essences fourragères et niveaux de vulnérabilité des parcours naturels, rassemble les chapitres V et VI. Le chapitre V traite de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution de quatre espèces fourragères du bassin versant

de la Sota. Enfin le chapitre VI est dévolu à la spatialisation des niveaux de vulnérabilité des parcours naturels du bassin versant de la Sota aux changements climatiques.

PREMIERE PARTIE : CADRES METHODOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE

La première partie de la thèse comprend deux chapitres. Le chapitre premier est relatif au cadre méthodologique qui a mis en exergue les principaux outils et approches ainsi que les méthodes par objectif spécifique. Le deuxième chapitre est consacré au cadre géographique de la recherche à travers ses aspects étudiés : milieu physiques et humains.

CHAPITRE 1 : CADRE METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE

Plusieurs approches méthodologiques (statistique, cartographique, socio-économique) ont été adoptées pour conduire la présente recherche.

1.1 Données de l'étude : nature et sources

Plusieurs catégories de données ont été utilisées dans la présente recherche. Ce sont les données climatologiques, hydrologiques, planimétriques, les données socio-économiques d'enquêtes ainsi que les données utilisées pour modéliser la distribution de quatre espèces fourragères.

1.1.1 Données climatologiques observées

La variabilité climatique a été étudiée à l'aide des chroniques pluviométriques et thermométriques. Les données pluviométriques sont celles de dix stations météorologiques localisées dans le bassin versant ou dans son voisinage au Bénin (Figure 1). Les chroniques thermométriques sont celles des stations synoptiques de Parakou et de Kandi. Ces données climatologiques couvrent la période de 1965 à 2010 et sont obtenues à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) et au Laboratoire Pierre PAGNEY ‘‘Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement’’ (LACEEDE) de l'Université d'Abomey-Calavi.

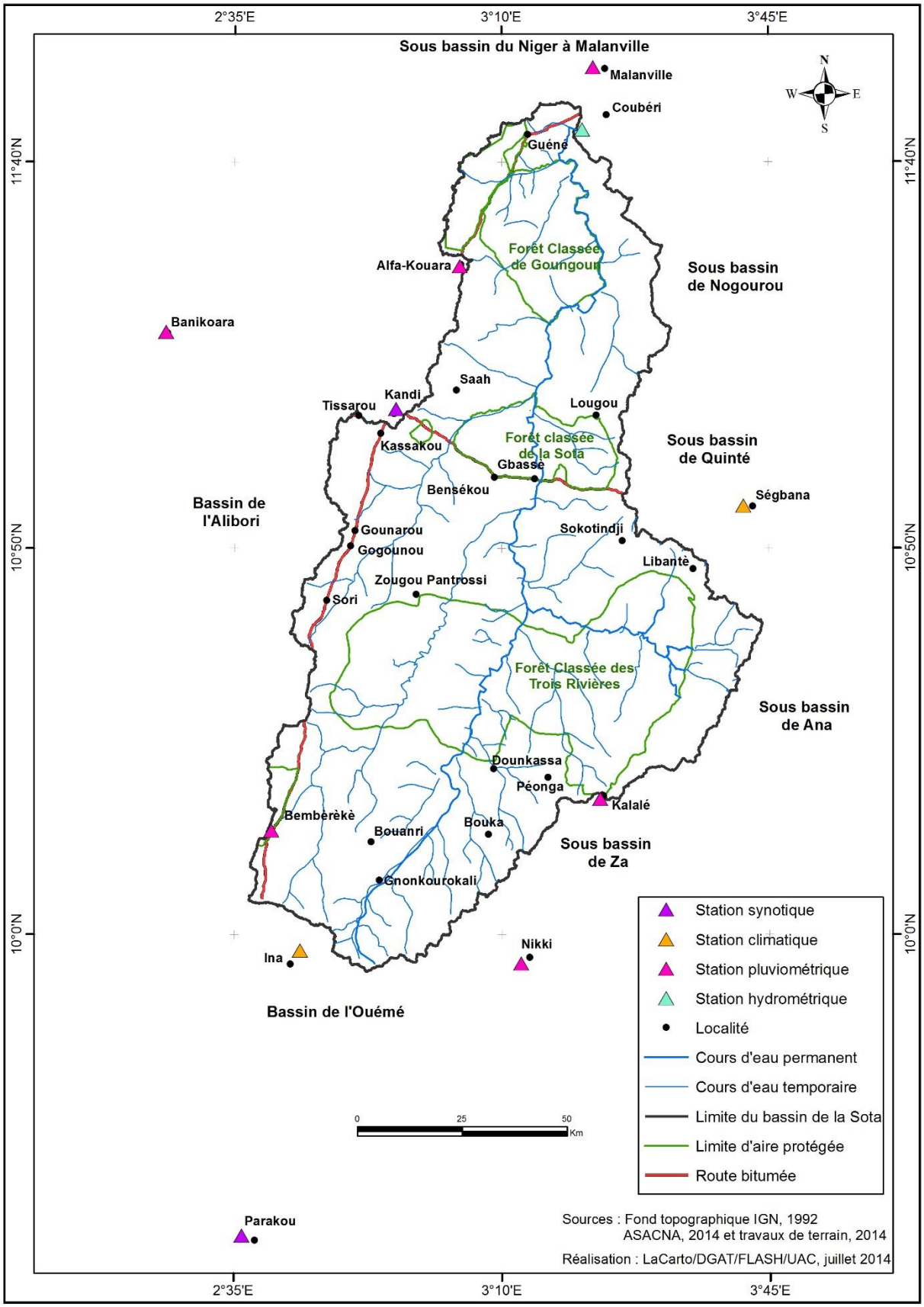


Figure 1 : Stations météorologiques du bassin versant de la Sota

1.1.2 Données climatologiques simulées

Pour étudier dynamique climatique future dans le bassin versant de la Sota, les données climatologiques simulées utilisées concernent les chroniques pluviométriques et thermométriques au pas de temps journalier sur la période 1960-2050 sorties du modèle climatique régional REMO (REgional MOdel). Le modèle REMO est considéré comme fiable pour ce qui concerne la reproduction des caractéristiques observées du climat africain en général et au Benin en particulier Paeth *et al*. (2005). Les données climatologiques des stations du Bénin issues du modèle REMO sont obtenues au projet IMPETUS. La base de données est constituée de trois simulations d'ensemble de REMO. Ces données de simulation sont disponibles sur la période 1960-2050 sous les scénarios climatiques A1B et B1.

Les scénarios climatiques tentent d'évaluer l'évolution future des gaz à effet de serre. Ils sont utilisés comme base pour les projections climatiques (Ogouwalé, 2013). Selon Nakicenovic *et al*. (2000), le scenario A1B est celui pour un équilibre des fournitures d'énergies mélangées alors que le scénario B1 propose une réduction de la consommation des matières premières, une introduction de technologies propres utilisant plus efficacement les ressources (une tendance tournée vers une augmentation des énergies renouvelables et nucléaires à long terme).

Pour chaque scenario, les données de trois simulations de REMO ont été utilisées.

1.1.3 Données hydrologiques

Ce sont des chroniques de débits annuels de la station de Coubéri (tableau I) localisée à l'exutoire du bassin. Les données débimétriques couvrent la période de 1965 à 2010 et sont collectées à la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau). Par ailleurs, les résultats des travaux de Koumassi (2014) ont aussi été utilisés pour analyser la variabilité hydrologique dans le bassin versant de la Sota.

Tableau I : Caractéristiques de la station de Coubéri

Station hydrométrique	Coordonnées		Superficie (Km^2)
	Latitude (N)	Longitude (E)	
Sota à Coubéri	11° 45'	3° 20'	13217

Source : Le Barbé *et al*. (1993)

1.1.4 Données planimétriques

La cartographie des changements d'état de l'occupation des terres a été réalisée à partir des images satellites et des points GPS (Global Positioning System). Les images mosaïquées utilisées sont :

- les images Landsat TM de 1995 ;
- les images Landsat ETM+ de 2006 ;
- les images Landsat OLI de 2013.

Les scènes mosaïquées sont : P192 et R052, P191 et R052, P192 et R053, P191 et R053. Ces différentes images ont été téléchargées sur le site earthexplorer.usgs.gov au format GEOTIFF.

1.1.5 Données démographiques et socioéconomiques

Les données démographiques et socioéconomiques sont relatives à l'effectif de la population, aux activités économiques et aux perceptions des populations sur la dynamique hydroclimatique dans le bassin versant de la Sota. Les données démographiques sont issues des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 1979, 1992, 2002 et 2013, à l'échelle des Communes du bassin versant. Ces données de recensement ont été complétées par les données de projection de la population en 2050.

Les données sur les activités économiques ont collectées grâce à la documentation existante et aux enquêtes des populations. Les données et informations sur les perceptions des populations sur la dynamique hydroclimatique du bassin versant de la Sota ont été collectées grâce aux enquêtes socio-économiques.

1.1.6 Données utilisées pour modéliser la distribution des essences fourragères

1.1.6.1 Données d'occurrence des espèces fourragères

Les données de présence de quatre espèces fourragères ont été collectées dans le secteur d'étude à l'aide d'un GPS. Ces données ont été collectées dans les placeaux de relevés phytosociologiques le long de 100 transects de 2 km de longueur chacun, installés de façon aléatoire sur l'ensemble du secteur d'étude. Cette base de données a été complétée par les points de présence disponibles dans la base de données du Laboratoire d'Ecologie

Appliquée (LEA) et sur le site de Global Biodiversity Information Facility (GBIF) : http://www.gbif.org.

1.1.6.2 Variables environnementales

En plus des données d'occurrence des quatre espèces fourragères, les données sur dix-neuf variables environnementales ont été utilisées. Ces données ont été obtenues à partir des données brutes de la base de données Worldclim (http://www.worldclim.org) de résolution 2,5 arc-minute au sol. Lesdites données sont issues d'interpolations à partir de données de plus de 20 000 stations météorologiques couvrant les cinq continents. Le tableau II présente les 19 variables environnementales utilisées pour générer les cartes des habitats actuels et potentiels de ces quatre espèces fourragères.

Tableau II : Variables environnementales utilisées pour générer les cartes de distribution potentielle des espèces fourragères

Variables environnementales BIOCLIM	
Bio_1	Température moyenne annuelle
Bio_2	Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)]
Bio_3	Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle
Bio_4	Saisonnalité de la température (écart-type *100)
Bio_5	Température maximal du mois le plus chaud
Bio_6	Température minimale du mois le plus froid
Bio_7	Variation annuelle de température
Bio_8	Température moyenne du trimestre le plus humide
Bio_9	Température moyenne du trimestre le plus sec
Bio_10	Température moyenne du trimestre le plus chaud
Bio_11	Température moyenne du trimestre le plus froid
Bio_12	Précipitation annuelle
Bio_13	Précipitation du mois le plus humide
Bio_14	Précipitation du mois le plus sec
Bio_15	Saisonnalité de la précipitation (coefficient de variation)
Bio_16	Précipitation du trimestre le plus humide
Bio_17	Précipitation du trimestre le plus sec
Bio_18	Précipitation du trimestre le plus chaud
Bio_19	Précipitation du trimestre le plus froid

Source : http://www.worldclim.org

1.2 Collecte des données

L'ensemble des données de la présente recherche ont été collectées grâce à la recherche documentaire et aux enquêtes sur le terrain.

1.2.1 Recherche documentaire

Dans le but de mieux cerner les contours du sujet, la recherche documentaire a été menée dans les institutions de recherche dont les activités sont en liaison avec les objectifs de la présente recherche. Elle a été conduite principalement dans différents laboratoires de recherche, différents centres de documentation, du campus numérique de l'Université d'Abomey-Calavi (annexe 7). De même certaines bases de données en ligne ont été exploitées.

Les données collectées au niveau de ces institutions nationales et celles consultées sur internet ont permis de faire le point des connaissances sur le sujet et de collecter des informations brutes qui ont été soumises à des traitements et analyses en relation avec les objectifs de la présente thèse.

1.2.2 Enquêtes socio-économiques

Les enquêtes socio-économiques ont été faites sur base d'un échantillon de la population cible choisie dans des villages judicieusement choisis.

1.2.2.1 Echantillonnage

Le choix des villages a été fait dans les sept Communes (Bembèrèkè, Gogounou, Kalalé, Kandi, Malanville, Nikki et Ségbana) du bassin versant de la Sota de façon raisonnée en se basant sur les critères suivants :

- appartenance au bassin de la Sota ;
- proximité au bassin de la Sota ;
- pratique des activités agropastorales dont notamment l'élevage transhumant ;
- accessibilité du village.

Dans ces villages retenus, les populations enquêtées sont constituées principalement des ménages agricoles (cultivateurs, agro-éleveurs, éleveurs).

Pour déterminer la taille de l'échantillon, la formule de Schwarzt (1995) a été utilisée. Soit N la taille de l'échantillon, on a :

$N = [(Z_\alpha)^2 \times PQ]/d^2$. Avec N = la taille de l'échantillon

Z_α = Ecart fixé ou écart réduit à un risque de 5 % (1,96) ce qui correspond à un degré de confiance de 95 %

P = Proportion des ménages agricoles par rapport au nombre total de ménages dans les sept Communes du bassin. Soit P = 77,73 %.

Or, Q = 1-P = 1 – 77,73

Q = 22,26 %

d = Le degré de précision = 5 % (0,05)

$N = (1,96)^2 \times 0,7773 \times 0, 2226)/0,05^2 = 266$

Donc, 266 chefs de ménages agricoles ou leurs représentants ont été choisis pour l'enquête.

En plus des chefs de ménages agricoles ou leurs représentants des personnes ressources ont été enquêtées. Ces personnes ressources sont constituées des autorités politico-administratives (Maires, Chefs de villages ou quartiers de villes et les élus locaux), des agents techniques (CARDER, SCDA, Eaux et forêts et ONG), des chefs traditionnels et personnalités religieuses.

Au total la taille de l'échantillon des personnes enquêtées est de 351 personnes. Le tableau III présente la répartition de cet échantillon par commune du bassin versant de la Sota.

Tableau III : Effectif des personnes enquêtées par Commune du bassin versant

Communes	**Nombre de chefs de ménages**	**Nombre de personnes ressources**
Bembèrèkè	36	10
Gogounou	38	10
Kalalé	42	17
Kandi	41	15
Malanville	39	14
Nikki	29	6
Segbana	41	13
Sous-totaux	*266*	*85*
Total	**351**	

Source : Données de synthèse, mars 2013

1.2.2.2 Outils et techniques d'enquête

Les enquêtes se sont déroulées en deux phases : une enquête exploratoire et l'enquête approfondie. L'enquête exploratoire a permis principalement d'identifier les manifestations des mutations climatiques et leurs effets tels que perçus localement par

les agro-éleveurs et les éleveurs de même que les stratégies mises en œuvre par ceux-ci. Dans ce cadre, des entretiens et des focus groupes ont été réalisés. Les entretiens ont été effectués avec des personnes ressources telles que les autorités politico-administratives, des chefs traditionnels et personnalités religieuses, les responsables et techniciens du développement rural (conseillers techniques en zootechnie, en production végétale, en aménagement et gestion des ressources naturelles, etc.) et les responsables d'associations de producteurs (agriculteurs et éleveurs). Les focus groupes (de 6 à 10 personnes) ont été organisés avec différentes catégories socio-professionnelles (agriculteurs, agro-éleveurs, éleveurs) appartenant à différents genres (hommes et femmes) et catégories d'âges (jeunes et personnes âgées).

A partir des données collectées lors de l'enquête exploratoire, deux questionnaires (Annexes 9) ont été élaborés. Le contenu du questionnaire a porté sur trois (3) centres d'intérêt : les manifestations/indicateurs, les effets des mutations climatiques et les stratégies mises en œuvre pour y faire face.

Le questionnaire a été administré par des entretiens individuels directs.

1.3 Méthodes de traitement et d'analyse des données

1.3.1 Méthode d'analyse de la variabilité hydroclimatique

1.3.1.1 Comblement des données hydroclimatiques manquantes

Une vérification manuelle systématique des fichiers de données brutes des hauteurs de pluies et des débits a permis d'éliminer des données manifestement fausses certainement dues à des erreurs de saisie. Ensuite, les données manquantes ont été comblées.

Ainsi, les données climatologiques et les débits manquants ont été reconstitués grâce à une méthode de comblement par prévision après corrélation. La corrélation est établie soit entre les données de différentes années sur la même station, soit entre les données de la station d'étude et celles d'une station voisine. Cette corrélation est retenue si et seulement si le coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,75. Cependant, les années ne disposant d'aucune donnée n'ont pu faire l'objet de comblement afin de ne pas biaiser les résultats.

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

Les valeurs connues sont des valeurs *x* et *y* existantes, et la nouvelle valeur prévue est calculée par régression linéaire à partir de la méthode des moindres carrées ordinaires. L'équation de la fonction de prévision est $y = a + bx$

où $a = \bar{y} - b\,\bar{x}$ et $b = \dfrac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$

avec *x* et *y* les moyennes d'échantillon moyenne (*x*_connus) et moyenne (*y*_connus) **x** représente l'observation dont la valeur va être prévue ; **y_connus** représente la matrice ou la plage de données dépendante ; **x_connus** représente la matrice ou la plage de données indépendante.

En effet, en raison de quelques lacunes observées dans les chroniques pluviométriques et pour répondre au problème de bilan hydrologique et climatique, il est nécessaire de déterminer le champ pluviométrique du bassin. Cette méthode a été utilisée par Akognongbé (2008) et Vodounnon (2010).

1.3.1.2 Interpolation spatiale des précipitations

L'interpolation spatiale est une des méthodes utilisée pour pallier le problème d'insuffisance de données ou de lacunes dans les données hydroclimatiques (Amani et Lebel, 1998). Dans la présente thèse, la méthode d'interpolation spatiale utilisée comporte trois étapes :

- une régression linéaire multiple, c'est-à-dire une régression des moyennes pluviométriques en fonction de trois paramètres que sont la latitude, la longitude et l'altitude. Ainsi, l'estimation de la moyenne par interpolation sur l'ensemble du complexe, à partir de 480 (480 = 40 ans x 12 mois) mesures ponctuelles des 11 stations retenues, s'avère nécessaire. C'est une généralisation directe à p variables explicatives de la régression linéaire simple. Elle permet de connaître la distribution de chaque variable prédictive à la variable à expliquer en neutralisant l'effet simultané de toutes les autres variables prédictives. Elle consiste ainsi, à estimer, à partir des données expérimentales (x_i, yi) (i = 1, 2, ...,

N), les paramètres a_0 et a_1 d'une loi liant les valeurs d'une variable aléatoire *y* à une variable indépendante non aléatoire *x*, selon le modèle : $y = E[y] + \varepsilon = a_0 a_1 x + \varepsilon$ où E[y] désigne l'espérance mathématique de la variable aléatoire "*y*" et ε est une variable aléatoire de moyenne nulle. La moyenne de la précipitation dans le bassin correspondant à la variable indépendante x est donnée par la loi linéaire $a_0 + a_1{}^{xi}$. Le paramètre a_1 mesurant la sensibilité de E[y] à *x*, est appelé le coefficient de régression. Ainsi, ce modèle exprime la relation linéaire entre plusieurs facteurs qualitatifs que sont : la latitude, la longitude et l'altitude. Le choix de ces trois variables permet de définir leur influence dans la répartition pluviale du bassin-versant. Cette précipitation estimée en tout point du bassin est ainsi définie à partir de la grille MNT (modèle Numérique de Terrain) de SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission) qui est une mise à jour du format GTOPO30. Dans le cadre de cette étude, la grille est de 1 km x 1 km. Ce qui a permis de disposer des coordonnées géographiques et de l'altitude de tous les points de grille du bassin-versant. Après la régression linéaire multiple, les ratios obtenus sont interpolés.

- Une interpolation simple des ratios (rapport des pluies observées et de la pluie estimée par le modèle de régression) regroupe l'interpolation spatiale et l'interpolation cubique. Il s'agit d'une interpolation cubique des champs moyens de pluie d'une part, et de la variation interannuelle de précipitations c'est-à-dire des écarts de pluie à la moyenne d'autre part. Les ratios obtenus décrivent la répartition de la pluie indépendamment des coordonnées géographiques. Ils ne représentent qu'une fraction de la variabilité spatiale de la pluie. Ils sont ensuite interpolés car ils ne sont pas explicites dans le modèle. Une interpolation est aussi faite séparant les ratios des pluies moyennes. Cette interpolation cubique s'effectue, en ajoutant une surface, souvent un polynôme, dans chaque triangle. Les valeurs régionalisées dans les stations pluviométriques du champ, formant les sommets du grand triangle dans lequel sont issus les petits triangles, sont incluses pour l'interpolation. A cet effet, le poids de chacune de ces valeurs est

égal à la portion de surface du grand triangle occupé par le petit triangle opposé au site.

Enfin, nous procédons à l'estimation pluviométrique moyenne et interannuelle qui est la reconstitution finale des champs de pluie du bassin-versant. Elle fait intervenir la liaison entre les ratios ou résidus interpolés, complétée par les pluies estimées par le modèle de régression linéaire en prenant en compte les liaisons pluviométrie/topographie.

1.3.1.3 Calcul des indices pluviométrique et hydrométrique

Le calcul des indices pluviométriques et hydrométriques permet de dégager les grandes tendances dans les séries chronologiques. A l'échelle interannuelle, ils permettent de mettre en évidence les phases déficitaires et les phases excédentaires. Ils sont calculés à partir de la formule suivante :

$$\chi'_i = \frac{X_i - \bar{x}}{\sigma(x)}$$

χ'_i = variable centrée réduite pour l'année i (indice pluviométrique ou hydrométrique selon la variable étudiée) ; $\bar{x}$ = moyenne de la série chronologique sur la période 1965-2010 $\sigma(x)$ = écart-type de la série chronologique sur la période 1965-2010.

L'indice pluviométrique est bien adapté au suivi des variations de la dynamique de la végétation en relation avec l'évolution de la pluviométrie (Diallo *et al.*, 2011).

Le Filtre Passe Bas de Hanning d'ordre 2 a été aussi utilisé pour avoir une meilleure visualisation des tendances. Cette méthode permet d'éliminer les variations saisonnières des données. Ce filtre est effectué au moyen des équations recommandées par (Assani, 1999). Selon cette méthode, chaque terme de la série est calculé de la manière suivante :

$$\boldsymbol{X_{(t)}} = 0{,}06x_{(t-2)} + 0{,}25x_{(t-1)} + 0{,}38x_{(t)} + 0{,}25x_{(t+1)} + 0{,}06x_{(t+2)}$$

Pour $3 \leq t \leq (n-2)$

$$\boldsymbol{X_{(1)}} = 0{,}54x_{(1)} + 0{,}46x_{(2)}$$

$$\boldsymbol{X_{(2)}} = 0{,}25x_{(1)} + 0{,}50x_{(2)} + 0{,}25x_{(3)}$$

$$\boldsymbol{X_{(n-1)}} = 0{,}25x_{(n-2)} + 0{,}50x_{(n-1)} + 0{,}25x_{(n)}$$

$$\boldsymbol{X_{(n)}} = 0{,}54x_{(n)} + 0{,}46x_{(n-1)}$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique et d'écoulement, ces moyennes mobiles pondérées sont ensuite centrées et réduites en utilisant la formule de la variable centrée réduite.

1.3.1.4 Recherche de tendance et de rupture de stationnarité dans les séries hydroclimatiques

Pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques pluviométrique et hydrométrique, il a été utilisé des tests statistiques portant sur l'analyse de tendance et de rupture en moyenne.

Le terme de tendance fait référence au changement dans les propriétés d'un processus aléatoire qui survient graduellement à l'échelle de la période d'échantillonnage alors qu'une rupture correspond à une modification qui survient subitement, étant entendu que les propriétés demeurent stables de part et d'autre de l'année de rupture (Perreault, 2000).

Le test de corrélation sur le rang de Kendall (Lubès-Niel *et al.*, 1998) a été utilisé pour analyser les tendances dans les séries chronologiques. Ce test vérifie le caractère aléatoire des séries chronologiques. L'hypothèse alternative du test est celle d'une tendance. Toutefois, en présence d'une rupture en moyenne dans la série, le test rejette l'hypothèse nulle sans que l'hypothèse de tendance soit valide.

La recherche de ruptures dans les séries chronologiques a été faite au moyen de différents tests : test de Pettitt, du test de Buishand et l'Ellipse de Bois, méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert.

- **Test de Pettitt**

L'approche de Pettitt (1979) est non paramétrique qui permet de détecter les «ruptures» dans les séries pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Ce test dérive du test de Mann-Whitney. En effet, l'approche de Pettitt est un test non paramétrique dérivé de celui de Mann-Whitney. Ce test a été souvent utilisé pour l'étude des variables hydrométéorologiques en Afrique (Hubert *et al*., 1989 ; Paturel *et al*., 1997 ; Lubès-Niel *et al*., 1994 ; Servat *et al*., 1998 ; Ardoin Bardin, 2004) et dans le contexte béninois par Houndénou (1999), Vissin (2007), Yabi (2008), Totin (2010). L'absence

de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (Xi) i =1 à t et t+1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable Ut, N définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{N} D_{ij}$$

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

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

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

Pour un risque α de première espèce donné, si Prob. (K_N > K) est inférieure à α, l'hypothèse nulle est rejetée. Ce test est réputé pour sa robustesse.

- **Méthode bayésienne de Lee & Heghinian**

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee & Heghinian, 1977) est une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées. Elle fait l'hypothèse d'une rupture en moyenne à un instant inconnu. La distribution a priori de l'instant de la rupture est uniforme, et compte tenu de cette information et des données, la méthode produit la distribution de probabilité a posteriori de l'instant de la rupture.
Elle est fondée sur le modèle suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & avec \quad i = 1,2,3,..., \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & avec \quad i = 1,2,3,..., N \end{cases}$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2. La position de la rupture dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne sont représentées respectivement par τ et δ. Le changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions ''a posteriori'' de τ et δ. Ainsi, cette méthode fournit la probabilité que le changement se produise au moment τ dans une série où est supposé a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment déterminé. Elle donne également une estimation de la probabilité que l'amplitude du

changement ait la valeur δ. La date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible et lorsque la distribution est unimodale.

En effet, d'après Hubert et Carbonnel (1987) et Hubert *et al*. (1989), cette procédure de segmentation peut être interprétée comme un test de stationnarité, "la série étudiée est stationnaire" constituant l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée. Aucun niveau de signification n'est attribué à ce test. Son principe est donc de "découper" la série en plusieurs segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment (s) voisin (s) par application du test de Scheffé. Ainsi, la procédure de segmentation de séries chronologiques consiste à découper la série en m segments (m>1) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment (s) voisin (s). La procédure de segmentation est décrite comme suit :

Toute série xi où i = i1, i2 avec $1 \leq i1 < i2 \leq N$, constitue un segment de la série initiale des (xi) avec i = 1, 2, …N. Toute partition de la série initiale en m segments constitue une segmentation de rang m définie par :

- Ik, k = 1, 2, …m le rang dans la série initiale de l'extrémité du kième ;
- Nk = ik-ik-1 la longueur du kième segment ;
- $\overline{X}_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i / n_k$ la moyenne du kième segment.

La quantité $D_m = \sum_{k=1}^{k=m} D_k = \sum_{k=1}^{k=m} \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \overline{x})^2$ est l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. La segmentation retenue est celle minimisée Dm.

Ces méthodes de détection des ruptures ont été utilisées dans plusieurs études hydro climatologiques en Afrique surtout dans sa partie occidentale (Hubert et Carbonnel, 1993 ; Aka *et al*., 1997 ; Paturel *et al*., 1997 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Sighomnou, 2004). Les années de rupture et les séries segmentées ont été utilisées pour caractériser les changements intervenus les chroniques pluviométriques.

1.3.1.5 Calcul des variations moyennes autour des ruptures

Pour les variables hydropluviométriques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture en appliquant la formule suivante (Ardoin-Bardin, 2004) :

$$D = \frac{\overline{x}_j - \overline{x}_i}{\overline{x}_i} * 100$$

D= déficit/excédent de part et d'autre de la rupture ; $\overline{x}_i$ = moyenne avant la rupture et $\overline{x}_j$ = moyenne après la rupture.

1.3.1.6 Etude du bilan hydrologique

L'étude du bilan hydrologique s'est réalisée en plusieurs étapes de calcul :

- la lame écoulée "Lec" (mm) du bassin qui est déterminé grâce à la formule $Lec = \frac{Qxt}{S} x10^3$ où Q représente le débit (m^3/s), **t** : temps (s) et **S** : superficie du bassin (km^2) ;
- l'évapotranspiration réelle (ETR) calculée avec la formule $ETR = \alpha ETP$ Le coefficient α traduit la disponibilité en eau des horizons du sol. Il est toujours inférieur ou égal à 1 ($\alpha \leq 1$) Si :
  - $Pi > ETPi$ alors $\alpha = 1$;
  - $Pi < ETPi$ alors $\alpha = \frac{Pi}{ETPi}$
- l'infiltration, calculée par la formule : $I = P - (Lec + ETR)$ est aussi calculée ;
- Le coefficient d'écoulement est un paramètre qui traduit la capacité de ruissellement d'un bassin. Ce coefficient évolue suivant les variations climatiques et montre les écarts de variation entre la pluie et les écoulements (Mahé et Olivry, 1995). Il a été calculé par la formule suivante : $C = \frac{Q}{P} X100$. Il correspond au rapport entre lame ruisselée (Q) et lame précipitée (P).
- du bilan hydrologique : $(P = ETR + Lec + I + (S_1 - S_0))$ avec I = infiltration, (S1 - S0) est variation du stock d'eau présent dans le bassin, en mm pendant une période donnée, elle est souvent négligeable.

1.3.1.7 Traitement des données socio-économiques

Les données socio-économiques ont été analysées statistiquement par le calcul du taux moyen de réponse pour chaque type de perception hydroclimatique perçue par les enquêtés.

Le taux moyen de réponse est calculé par la formule : $\mathbf{F = 100\frac{S}{N}}$ avec F : taux de réponse donnée pour une perception de la variabilité hydroclimatique ; S : nombre de personnes ayant une même réponse pour l'utilisation concernée ; N : nombre total de personnes interviewées.

1.3.2 Méthode d'analyse de la dynamique de l'occupation des terres

1.3.2.1 Analyse statistique des changements d'état des unités d'occupation des terres

- ✓ **Matrice de transition**

Elle permet de mettre en évidence les différentes formes de conversion qu'ont subies les formations végétales entre deux instantanées. Elle est constituée de X lignes et de Y colonnes. Le nombre de lignes de la matrice indique le nombre de formations végétales au temps t_0 ; le nombre Y de colonnes de la matrice est le nombre de classes de végétation converties au temps t_1 et la diagonale contient les superficies des formations végétales restées inchangées. Les transformations se font donc des lignes vers les colonnes. Les superficies de ces différentes classes de végétation ont été calculées à partir du croisement des cartes de végétation de deux dates à l'aide de la fonction *Intersect* de la boîte à outils Arctoolbox du logiciel ArcGIS 10.3.

- ✓ **Calcul des Taux moyens annuels d'expansion spatiale (T)**

Le taux moyen annuel d'expansion spatiale exprime la proportion de chaque unité d'occupation des terres qui change annuellement. A partir de la superficie de ces unités, ce taux a été calculé grâce à la formule de Bernier (1992) :

$$T = [(lnS_2 - lnS_1) / ((t_2 - t_1) \times lne)] \times 100$$

S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ; $t_2 - t_1$: Nombre d'année d'évolution ; *ln* : Logarithme népérien ; *e* : Base du logarithme népérien (e = 2,71828).

- ✓ **Calcul de la vitesse d'évolution des unités d'occupation des terres**

Afin de connaître la vitesse de variation des unités d'occupation des terres identifiées, la formule suivante a été utilisée :

$$\Delta_s = \frac{S_{P2} - S_{P1}}{t_2 - t_1}$$

Où : Δ_s = Vitesse de variation (extension ou régression en ha/an) ; S_{P1} = Superficie occupée par l'unité d'occupation considérée au cours de l'année 1 (ha) ; S_{P2} = Superficie occupée par l'unité d'occupation considérée au cours de l'année 2 (ha) ; t_1 = année 1 ; t_2 = année 2.

1.3.2.2 Analyse de l'intensité et de la vitesse des changements

Dans la présente étude deux programmes d'analyse (Pontius Matrix 22 et intensity analysis 02.xlms) de Aldwailk et Pontius (2012), ont permis de mesurer (%) les intensités des changements selon les intervalles de temps, les catégories et les transitions entre catégorie d'occupation des terres.

Le premier programme s'est basé sur les matrices de transition obtenues pour les intervalles de temps 1995-2006 et 2006-2013 pour générer des graphiques montrant lesdites intensités selon les intervalles de temps. Les graphiques présentent l'intensité et la vitesse de changement des unités d'occupation des terres entre 1995-2006 et 2006-2013. A ce niveau, l'état de rapidité des changements est déterminé grâce à la ligne verticale en tireté rouge, appelée ligne de zone uniforme. Si le graphique est à gauche de cette ligne ou les changements devraient s'arrêter si les perturbations ne continuaient plus, le changement est dit lent (ou dormant). Mais si celle-ci est à droite de cette ligne, le changement est rapide (ou actif).

Le second programme grâce à la matrice de transition a aussi permis de générer les statistiques pour les changements selon les intervalles de temps, entre chaque catégorie d'occupation des terres et les autres. Il est de même pour les pertes et gains survenus lors des transitions entre unités.

1.3.2.3 Analyse de la capacité de rétention en eau des classes d'occupation des terres

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation des terres sur les écoulements, un indice représentant la capacité de rétention en eau au niveau de chaque classe d'occupation des terres est déterminé. Ainsi, si l'on appelle *pi* le pourcentage en superficie de la zone d'étude occupée par la classe *i* et a_i un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe *i*, alors, *Cr* est obtenu selon Cecchi *et al.* (2009), par la formule suivante utilisée par Soro *et al.* (2014) :

$$\mathrm{Cr} = \sum p_{\mathrm{i}} \times \mathrm{a}_{\mathrm{i}}$$

Les a_i ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement ; Tableau IV) (Cecchi *et al.*, 2009). Partant de cette définition, le coefficient *Cr*, compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des terres par télédétection (> 25 km²). Dans ce cas, les valeurs fortes (> 100) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

Tableau IV : Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des terres

Classes d'occupation des terres	$\mathbf{a_i}$
Forêts	2
Savanes arbustives	1
Savanes arborées	2
Savanes faiblement cultivées	1
Plantations	1
Cultures	1
Affleurements rocheux	0
Sols dénudés	0
Agglomérations	0

Source : Cecchi *et al.*, 2009

1.3.2.4 Méthode de projection de l'occupation des terres à l'horizon 2050

Le modèle prédictif travaille avec deux cartes d'occupation des terres, une carte actuelle et une carte antérieure. Dans le cas de la présente étude, il s'agit des cartes d'occupation des terres de 2000 et de 2013. Une étude comparative de ces deux dates a permis de déterminer les transitions, de quantifier les surfaces concernées par chaque type de transition et de localiser ces changements. Les matrices de transition ainsi calculées sont utilisées pour calculer les changements potentiels futurs. Chaque type de transition peut être expliqué par des facteurs connus, quantifiables et cartographiables. Le modèle va ensuite combiner les différents facteurs en leur assignant des poids plus ou moins forts afin d'expliquer les transitions qu'il a détecté entre les deux cartes d'occupation des terres fournies au début. Grâce à la mise en relation et la combinaison des facteurs explicatifs et des changements survenus entre les deux cartes d'occupation des terres d'origine, le modèle va réaliser via une méthode statistique des cartes de probabilité aux changements. Ces cartes de probabilité correspondent aux transitions retenues. Le nombre de carte de probabilité est fonction du nombre de transition isolé. Ce sont alors les premières cartes fournies par le modèle. Ensuite, le modèle va produire une carte d'occupation du sol prospective pour une date t_n en se basant sur les cartes de probabilité précédemment réalisées (figure 2). Cette étape réalisée grâce à un automate cellulaire simule les changements précédemment identifiés et les allouent dans l'espace.

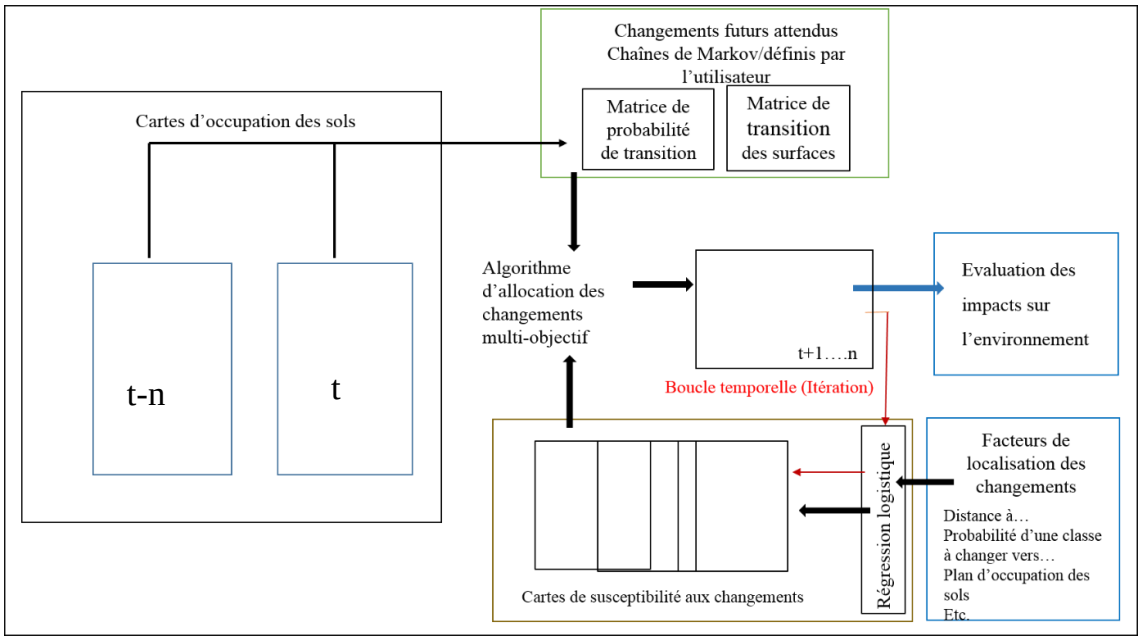


Figure 2 : Fonctionnement du modèle LCM (Aguejdad et Houet, 2008)

- **Inputs de la modélisation**

La carte de végétation de 2006 et celle de 2013 sont les inputs fondamentaux pris en compte pour modéliser l'évolution des parcours naturels. Les variables utilisées sont : distance par rapport aux aires protégées, distance par rapport aux cours et points d'eau.

- **Estimation de la quantité de changement**

Avec Land Change Modeler (LCM), la quantité de changement est calculée à l'aide de la chaîne de Markov, synthétisée sous forme d'une matrice de transition, généralement obtenue par la comparaison de cartes d'occupation et d'utilisation des terres de deux dates différentes. La matrice de transition entre 2006 et 2013 obtenue en superposant les deux cartes d'occupation des terres, indique la surface (ou le nombre de pixels) pour chaque transition. Cette matrice a été transformée en une matrice de probabilité de transition qui a permis de réaliser les projections sur 2050. Le nombre d'itérations obtenu est de 10000 avec une précision de 89 %. Les probabilités de transition annuelle sont obtenues par une simple correction linéaire des probabilités de transition. Cette correction consiste à réduire les probabilités les plus élevées (probabilités supérieures ou égales à celles des transitions de permanence) proportionnellement à l'erreur et à modifier les autres valeurs de probabilités afin que la somme des colonnes soit égale à 1.

- **Evaluation de la probabilité de changement**

La probabilité de changement dépend de la distribution des variables biophysiques et socio-économiques qui influencent les LULCC. Les variables les plus couramment utilisés sont la pente, la distance aux voies de communication et aux agglomérations, les types de sols (Pontius *et al.*, 2008). La probabilité d'occurrence d'un type de transition donnée ($LULC_X$ vers $LULC_Y$) peut être définie à travers deux approches légèrement différentes : la détermination de l'aptitude d'un site pour un type d'occupation et d'utilisation des terres ou le calcul de la probabilité des types de transitions. Le modèle LCM calcule la probabilité de chaque transition. Ces données restituées sous forme de cartes sont produites à partir de la relation entre les variables explicatives et les transitions observées entre 1988 et 2013. Cette carte illustre l'importance et la localisation de ces transitions. Ainsi, elle servira à l'élaboration de la carte prédictive.

- **Procédures d'allocation spatiale des changements**

L'attribution du changement est un processus de décision qui sélectionne les pixels qui connaîtront un changement à partir des cartes de probabilité de changement ou cartes d'aptitude. Considérant que ce sont les sites les plus susceptibles de changer qui changent effectivement, LCM sélectionne les pixels qui présentent les valeurs de probabilité les plus fortes. Comme il y a généralement une concurrence entre les différentes transitions (le même site peut être un candidat à différentes transitions), LCM utilise une procédure d'affectation multi-objective basée sur les probabilités des différents types d'occupation du sol et la quantité de changement calculée précédemment.

- **Simulation des dynamiques spatiales et temporelles des changements d'occupation et d'utilisation des sols**

La simple sélection des pixels avec une probabilité de changement plus élevée (sans automate cellulaire) ne conduit pas à la reproduction de patrons spatiaux vraisemblables. LCM tend à favoriser les zones à proximité directe de la route pour le LULC 2 et celles étant à la même altitude pour le LULC 3. Pour la classe LULC 2, on observe très nettement l'effet issu de l'utilisation de variables continues pour caractériser l'influence de la distance à la route. CLUE présente un résultat semblable mais favorise les LULCC à LULC 3 en altitude due à la régression logistique. L'utilisation de zones de restriction ou d'incitation permet d'ajuster la probabilité de changement à certaines politiques de gestion qui ne peuvent être dérivés à partir des variables explicatives. LCM permet l'utilisation de zones de restriction ou d'incitation à un ou plusieurs pas de temps défini (s) par l'utilisateur durant la simulation.

- **Evaluation des simulations**

En général, l'évaluation des modèles est basée sur la comparaison entre la carte simulée et une carte de la situation réelle observée (carte réelle). L'évaluation peut concerner la ou les carte (s) de probabilité de changement (appelée aussi « soft classification ») ou les cartes des futures occupations et utilisations des terres. Dans le premier cas, la carte des probabilités de changement (valeurs continues) est comparée avec la carte réelle (valeurs catégorielles). Dans le second cas, les cartes simulée et réelle sont comparées.

IDRISI offre un moyen d'évaluer les résultats de la simulation pour chaque cas : 1) la méthode ROC (Relative Operating Characteristics) (Pontius, 2000 ; Pontius & Schneider, 2001) ; 2) -èl'indice Kappa (Ponce, 2000). Mais l'évaluation de l'analyse de régression logistique est généralement basée sur une analyse ROC réalisée dans un autre logiciel.

Il faut remarquer que les méthodes d'évaluation sont toutes orientées sur l'évaluation de la coïncidence spatiale entre les changements simulés et les changements observés. Cette approche peut biaiser les évaluations vers une surévaluation des méthodes qui affectent les changements aux pixels qui présentent les valeurs plus élevées de probabilités de changements. En effet, la reproduction des patrons spatiaux du paysage se fait au dépend de la coïncidence spatiale. Pour les applications dans lesquelles la simulation des patrons spatiaux des paysages est importante, il est recommandé d'évaluer cet aspect, par exemple à l'aide d'indices de fragmentation (Mas *et al.*, 2010). IDRISI permet de calculer différents indices.

1.3.3 Méthode d'analyse de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution des essences fourragères

1.3.3.1 Présentation du modèle Maxent

L'Entropie maximale (MAXENT en anglais) est une méthode de modélisation de niche écologique qui a été développée en associant l'information de distribution des espèces, uniquement aux sites de présence connus. C'est également une méthode polyvalente, pour faire des projections ou des inférences à partir d'informations incomplètes. Semblable à la régression logistique, MAXENT pèse chaque variable environnementale, en utilisant une constante. La distribution de la probabilité est la somme de chaque variable pondérée divisée par une constante de mise à l'échelle, en vue de s'assurer que la valeur de la probabilité varie de 0 à 1.

Les informations disponibles sur la cible de distribution se présentent souvent comme un ensemble de variables à valeurs réelles, appelé « caractéristiques », et les contraintes sont, que la valeur attendue de chaque fonction doit correspondre à la moyenne empirique (valeur moyenne pour un ensemble de points de l'échantillon prélevée dans la cible de distribution" ; Phillips *et al*., 2006).

Chaque fonction, c'est-à-dire, les variables environnementales, est pondérée en fonction du degré de complexité qu'elle ajoute au modèle. La distribution de la probabilité est la somme de chaque variable pondérée, divisée par une constante scalaire, en vue de s'assurer que la valeur de la probabilité varie de 0 à 1. Le programme démarre avec une distribution uniforme de probabilité, et fonctionne en cycles, en ajustant les probabilités d'entropie maximale. Il altère itérativement un poids à la fois, afin de maximiser les chances de parvenir à la distribution optimale de probabilité.

Maxent fonctionne extrêmement bien dans le cadre des prévisions d'événements, en particulier avec des informations incomplètes, et est considéré comme le modèle le plus précis, par rapport aux autres approches courantes, (Elith et *al*., 2006 ; Hijmans et Graham, 2006). Il fonctionne également bien avec les petits sites d'échantillonnage des données se rapportant à un événement, et avec les variables environnementales continues et catégoriques. Enfin, le biais rattaché à la sélection de l'échantillon est le plus gros problème de cette méthode basée uniquement sur le site de présence.

1.3.3.2 Variables environnementales

L'analyse de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution de quatre espèces fourragères a été faite à l'aide du modèle Maxent. Pour les projections climatiques futures, trois modèles de circulation générale (Global Circulation Models: GCMs) parmi les plus recommandés (IPCC, 2007) ont été utilisés. Il s'agit des modèles CCCMA (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis), HadCM3 (Hadley Centre for Coupled Model version 3) et CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization). Pour tous ces modèles, les projections faites pour 2050 ont été utilisées sous le scénario d'émission A2. Ce scénario est utilisé de préférence car il prédit une situation considérée plus probable pour l'Afrique à l'horizon 2050 (Williams *et al.,* 2007).

Diverses méthodes statistiques sont utilisées pour modéliser la distribution des habitats favorables ou non à la présence des espèces ou encore pour estimer la probabilité de présence/absence d'une espèce donnée à une position géographique donnée (Guisan *et al.,* 2000). Le logiciel ArcGIS 10.3 et le programme maxent (*maximum entropy modeling*) ont été utilisé dans le cadre de cette étude. Maxent permet d'avoir de bonnes informations biogéographiques tout en offrant une bonne discrimination des habitats

favorables et non favorables à une espèce du point de vue bioclimatique (Phillips *et al.*, 2006). Cette méthode a été déjà utilisée avec succès par plusieurs auteurs (Gbesso *et al*., 2013 ; Fandohan *et al*., 2013, Toko Mouhamadou, 2014 et Saliou *et al.*, 2015) au Bénin.

1.3.3.3 Calibrage du modèle Maxent

Le modèle a été d'abord testé par 30 % des points de présence de chaque espèce étudiée puis 70 % des points restants ont permis de le calibrer. Le premier jeu de résultats de prédiction obtenu a permis d'isoler les variables environnementales individuelles n'ayant pas contribué à la prédiction des habitats présents et futurs suivant les scénarii utilisés. Ensuite, le modèle a été à nouveau calibré. Le test de Jackknife a été réalisé pour déterminer l'importance des variables environnementales individuelles utilisées. Par ailleurs, la statistique de AUC (Area Under the Curve) (Phillips *et al.*, 2006) a été utilisée pour l'appréciation de la performance du modèle. Selon Swets (1988), le modèle est dit performant si la valeur de AUC est supérieur à 0,90 ; il est passable lorsque $0,75 \leq AUC \leq 0,90$ et il est qualifié de mauvais si $AUC < 0,75$.

1.3.4 Méthode de spatialisation des niveaux de vulnérabilité des parcours naturels

La vulnérabilité d'un système aux variabilités hydroclimatiques désigne la mesure dans laquelle un système est sensible ou incapable de faire face aux effets défavorables des variations hydroclimatiques (Koumassi, 2014).

La vulnérabilité des parcours naturels à la dynamique hydroclimatique dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050 a été évaluée en superposant à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3 trois types de cartes : la carte de la pression bovine, la carte de la pression bovine à l'horizon 2050, la carte de la distribution potentielle des espèces fourragères à l'horizon 2050 et la carte d'occupation des terres à l'horizon 2050.

1.3.4.1 Réalisation de la carte de pression pastorale

La réalisation de la carte de la pression bovine à l'horizon 2050 a été réalisée suivant plusieurs étapes. Ces étapes sont :

Etape 1 : interprétation et classification des images satellites couvrant le bassin de la Sota avec les logiciels de SIG.

Etape 2 : extraction des unités d'occupation des terres au niveau des sept Communes du bassin de la Sota.

Etape 3 : calcul des superficies des unités d'occupation des terres du bassin de la Sota.

Etape 4 : évaluation des espaces disponibles (espaces supposés encore naturel) devant servir à l'alimentation du bétail en soustrayant les espaces anthropisés de l'espace communal.

Etape 5 : calcul de la charge animale par le procédé suivant :

Le calcul de la charge animale (taux de charge écologique) à l'échelle des Communes a été possible après conversion du nombre de têtes de bovins en UBT (1UBT = 250 kg). Deux années ont été considérées 2013 et 2050. Les données de projection sont issues de la formule suivante, obtenue à la Direction de l'Elevage à Cotonou en Mars 2015 :

$$Eff[t+1] = Eff[t]\,x(1+0{,}026) = Eff[t]\,x\,1{,}026$$

Avec Eff[t] : effectif la population bovine à un temps (t) donné ; Eff[t+1] : Effectif du cheptel bovin au cours de l'année t+1 ; 0,026 : taux d'accroissement annuel du cheptel bovin

$$\text{Pressions pastorales (Charge animale)} = \frac{\text{Nombre total du cheptel (UBT)}}{\text{Superficie de l'espace considéré (ha)}}$$

La superficie disponible dans les Communes (Sup_d) a été calculée en soustrayant les superficies des agglomérations (Sup_agglo), des sols nus (SN), des formations rocheuses (Sup_Fr) et des domaines classés (Sup_dc), de la superficie totale (Sup_com) en ha de chaque Commune.

Une cartographie de la charge animale ou pression pastorale sur les ressources naturelles a été faite à partir des méthodes de discrétisation selon les quantiles (Pumain, 2007). Cette méthode a permis d'apprécier les zones de fortes, moyennes et faibles concentrations animales.

Les deux autres cartes (la carte de la distribution potentielle des espèces fourragères à l'horizon 2050 et la carte d'occupation des terres à l'horizon 2050) sont celles obtenues aux chapitres quatre et cinq.

1.3.4.2 Réalisation de la carte de sensibilité aux changements climatiques

La carte de sensibilité des parcours naturels a été obtenue en procédant à un regroupement en trois classes des unités d'occupation des terres à l'horizon 2050. Ainsi, les unités de forêt galerie, de forêt dense sèche et de forêt claire et savane boisée ont été regroupées pour donner la classe de zone peu sensible à la pression pastorale. Les classes de savane arborée, de savane arbustive, de plantation, de mosaïques de champs et jachères ont été fusionnées pour donner la classe de zone moyennement sensible à la pression pastorale. Les classes de surface rocheuse, de sol dénudé et d'agglomération ont été fusionnées pour donner la classe de zone très sensible à la pression pastorale. Cette opération a donné la carte des zones sensibles à la pression pastorale. La superposition de ces cartes permet de distinguer différentes zones de vulnérabilité.

Conclusion partielle

Le présent chapitre a présenté les caractéristiques des données collectées et les méthodes d'analyses statistiques utilisées pour cette recherche.

La cartographie de la dynamique de l'occupation des terres par télédétection avec des images Landsat ETM+ et Oli a permis d'apprécier les changements de la dynamique des formations végétales dans le bassin versant de la Sota.

Le modèle Land Change Modeler a été utilisé pour simuler la dynamique prospective de l'occupation des terres dans le bassin à l'horizon 2050.

Quant aux modèles CCCMA (*Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis*), HadCM3 (*Hadley Centre for Coupled Model* version 3) et CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*), ils ont été utilisés dans le cadre de la prédiction des situations considérées plus probables des extensions des habitats à l'horizon 2050 de quatre espèces fourragères.

CHAPITRE 2 : CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE

Le chapitre 2 présente les caractéristiques biophysiques et socio-économiques du cadre d'étude. La connaissance des éléments du climat, du substratum géologique et pédologique, du paysage morphologique, du réseau hydrographique, des types de végétation et des traits socioéconomiques est nécessaire pour la compréhension des effets des changements climatiques des dans le bassin de la Sota.

2.1 Situation géographique et justification du choix du bassin de la Sota (BVS)

Le bassin de la Sota (figure 3) est situé au Nord-Est du Bénin. Il est localisé entre 9°54'35" et 11°55'2" de latitudes nord et entre 3°33'6" et 3°46'44" de longitudes est (Codjia cité par Vodounnon, 2009). Il couvre une superficie de 13 410 km², soit 11 % de la superficie du Bénin et regroupe les sous bassins de la Sota à Gbassè (8 300 km²) et de la Sota à Coubéri (13 410 Km²). Il est limité au nord par la vallée du Niger, au sud par le bassin de l'Okpara, sud-ouest par le bassin de l'Ouémé, au sud-est par le bassin de Mano à l'est par le bassin de Niger et à l'ouest par le bassin de l'Alibori.

Le bassin de la Sota s'étend sur les Communes de Malanville, Ségbana, Kandi et Gogounou dans le Département de l'Alibori et les Communes de Bembèrèkè, Kalalé et Nikki dans le Département du Borgou.

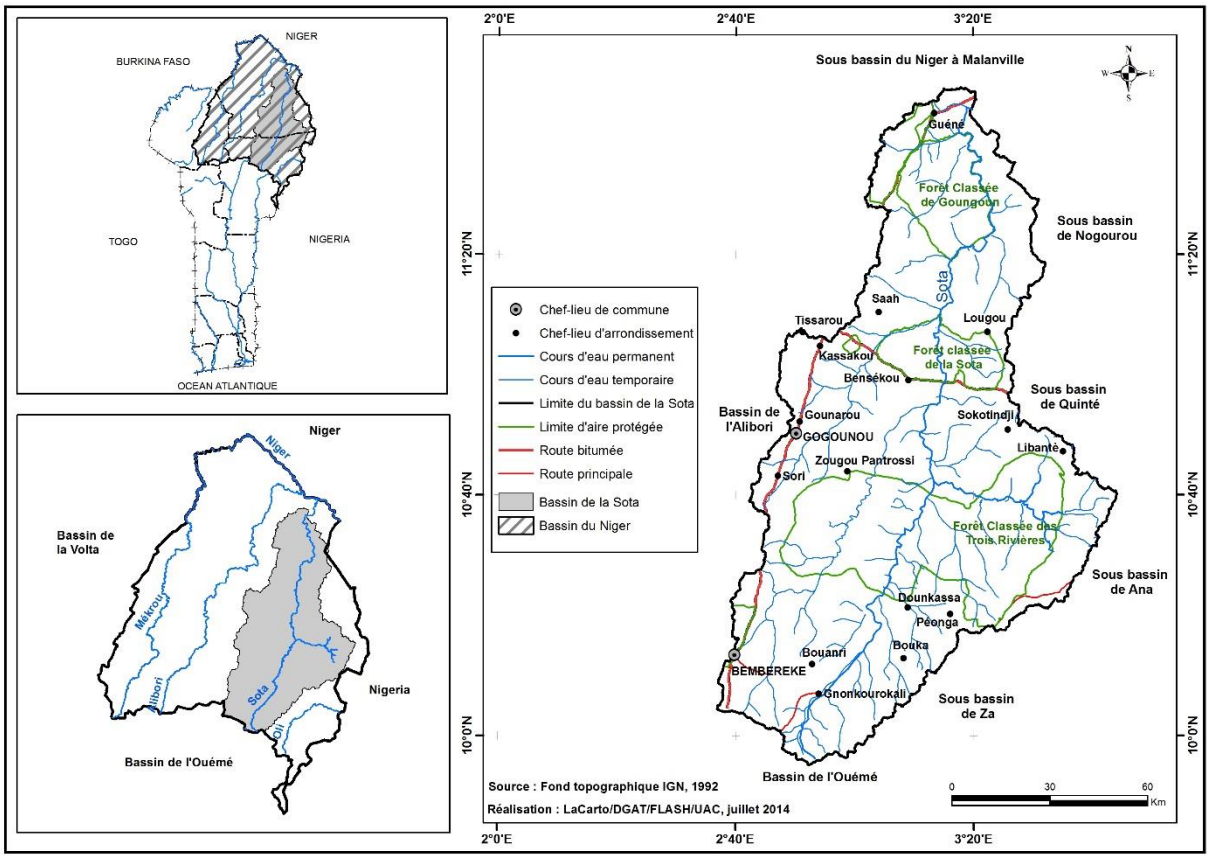


Figure 3 : Localisation du bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri

Le choix de ce bassin comme cadre géographique de la présente recherche s'explique par le fait qu'il abrite différentes zones agro-écologiques qui subissent depuis ces dernières années la déforestation, la dégradation des terres révélant de ce fait la vulnérabilité des écosystèmes (IFDC, 2006). En effet, les menaces auxquels les forêts sont soumises engendrent la rareté ou la disparition de certaines espèces. La perte de la végétation naturelle, l'érosion hydrique, l'appauvrissement des sols sont des phénomènes liés aux diverses modes d'utilisation des terres (Vodounnon, 2010). A ces problèmes, il faut ajouter le fait que ce bassin versant est sujet à une importante variabilité hydroclimatique marquée par une baisse des cumuls pluviométriques de l'ordre de 20 % sur la période 1960 à 2010 (Koumassi, 2014).

Par ailleurs, le bassin versant de la Sota appartient à la région du Bénin qui abrite le plus important cheptel de ruminants conduit selon le mode d'élevage extensif des éleveurs transhumants. Ces ruminants se nourrissent donc essentiellement des ressources des parcours naturels. Une étude de la vulnérabilité de ces parcours naturels aux

changements climatiques pourrait permettre d'adopter des stratégies d'adaptation plus efficaces.

2.2 Caractéristiques biophysiques

2.2.1 Réseau hydrographique

La rivière Sota (254 Km) est le principal cours d'eau du bassin (figure 4). La Sota prend sa source à plus de 400 m d'altitude sur les flancs est du plateau gréseux de Kalalé qu'elle va contourner par le nord avant d'emprunter la direction SSW-NNE sur les formations du socle. 90 km après sa source, elle pénètre dans les formations gréseuses du Crétacé qu'elle entaille assez profondément et rejoint après 254 km de parcours, le Niger, 1km à l'aval de Malanville (Le Barbe *et al*., 1993). La Sota a plusieurs affluents. Elle reçoit successivement le Souamon sur sa rive gauche, leTassiné (long de 102 Km avec une superficie de 3 031 Km^2), le Bouli (145 Km de long et 2 380 Km^2 de superficie), l'lrané (55 Km de long et 1 832 Km^2 de superficie), le Gouroukpa et la cascade de Sosso sur sa rive gauche. En aval de Coubéri, la Sota serpente sur 15 km dans les alluvions de la vallée du Niger avant de confluer avec ce dernier à 1 km en aval de Malanville. Sur les formations gréseuses, le réseau est très peu dense. En revanche, sur les granites et sur les formations gneissiques, le réseau hydrographique est beaucoup plus important (Le Barbe *et al*, 1993 ; Vissin, 2007).

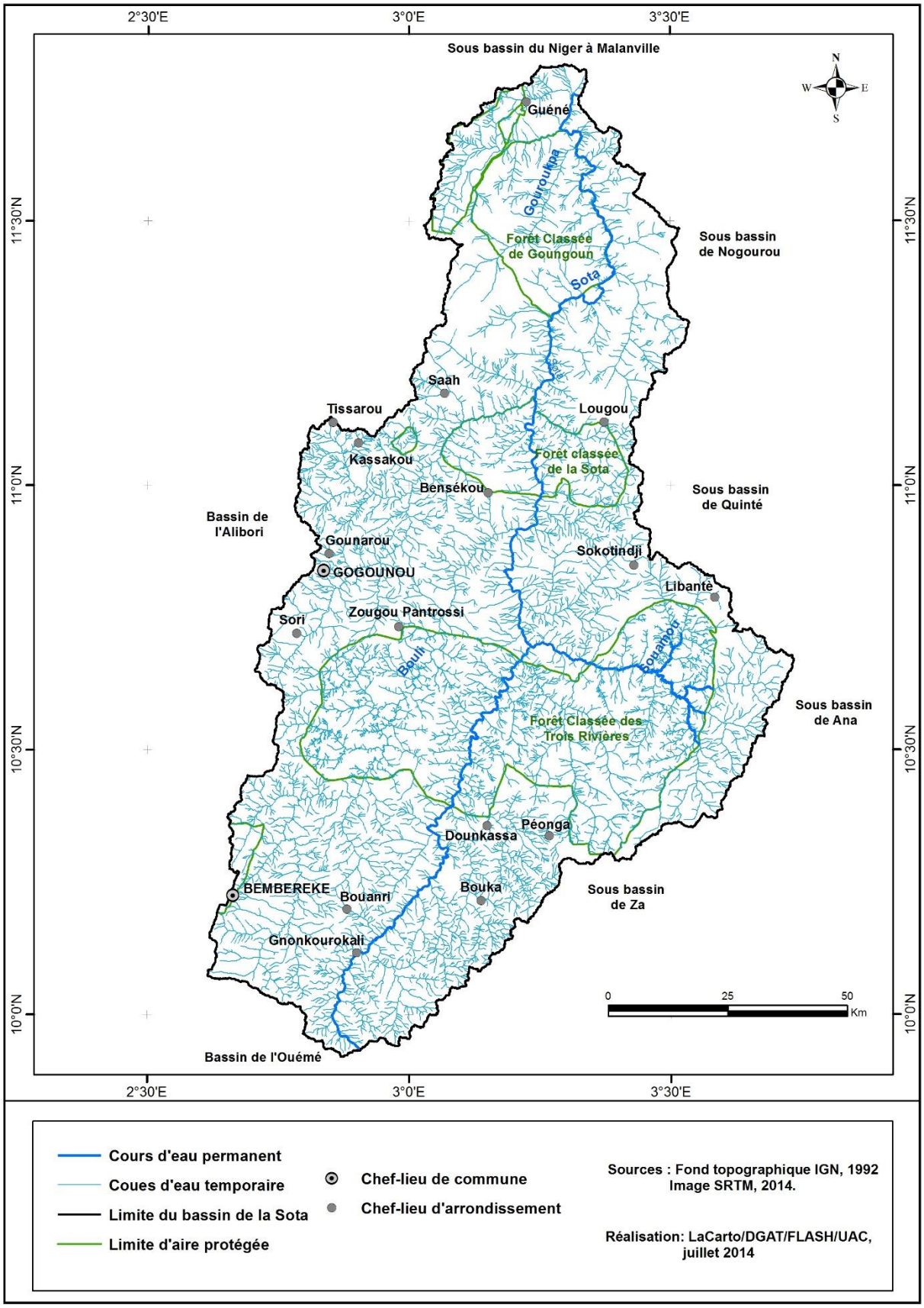


Figure 4 : Réseau hydrographique du bassin de la Sota

2.2.2 Contexte hydrogéologique du bassin de la Sota (BVS)

Le bassin de la Sota s'étend sur deux formations géologiques : les formations du socle et des grès sédimentaires de Kandi (Le Barbé *et al*, 1993 ; Adam et Boko, 1993 ; Vissin, 2007). Au sud de Gbassé, c'est-à-dire dans le bassin supérieur de la Sota, s'étend des formations du socle granito-gneissique précambrien composées essentiellement de gneiss-migmatite, de micaschiste, de diorite et de quelque quartzite accompagné localement de granite. Ce socle s'abaisse graduellement vers le nord-est et est surmonté en discordance par une pente de 20 % d'un ensemble gréseux appelé grès de Kandi (Le Barbe *et al.*, 1993 ; Vissin, 2001). Les roches du socle sont imperméables, en dessous d'une zone d'altération importante. Les études antérieures (Lessard, 1964 ; Le Barbé *et al*., 1993 ; Vissin 1998), montrent que le potentiel en eau des aquifères varie en fonction des roches en présence. Ces aquifères sont cantonnés dans les couches d'altération qui surmontent les altérites et la roche saine sous-jacente. Leur puissance varie de 5 à 20 m, mais peut atteindre 30 m au niveau des fractures. Cet aquifère alimente les puits à grand diamètre. La perméabilité moyenne est bonne (k = 6 000 – 8 000 m/s). Les ouvrages de captage (puits et puisards) tarissent pour la plupart vers les mois de mars et avril. Les débits exploités sont souvent dérisoires (Q = +/- 1 m^3/h) (DH, 1998). L'imperméabilité des roches fait que les réserves souterraines s'épuisent rapidement à la fin de la saison des pluies. Seules les zones fissurées, dans les granites et les arènes granitiques, peuvent emmagasiner une certaine quantité d'eau qui ne contribue que faiblement à alimenter les débits d'étiage.

Selon Vissin (2007), les bassins inférieur et moyen de la Sota, au nord de Gbassè sont constitués d'un mélange de conglomérats de diorite, de gneiss et de migmatite (Lessard, 1964), surmonté d'une variété de grès qui couvre plus de 93 % de la superficie du sous bassin de la Sota à Coubéri. Les formations de grès de Kandi selon Alidou et Lang (1978), reposent en discordance sur le socle précambrien par l'intermédiaire d'un conglomérat de base ou d'un grès grossier conglomératique. On distingue d'une part les formations de Wèrè et de Goungoun qui se sont déposées à l'Ouest du bassin et d'autre part les formations de Kandi et de Sinendé à l'Est.

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

- des grès sableux, fins à moyens, très tendres, légèrement arkosiques (grès feldspathiques résultant de la cimentation d'une roche granitique ou gneissique) vers la base, d'une épaisseur de 40 m environ, visibles à partir du talweg ;
- des grès grossiers et des silts (sédiments meubles très fins, plus ou moins consolidés), blancs ou violacés, comportant à leur base des grès argileux en plaquettes, de 10 m d'épaisseur environ ;
- le continental terminal (conglomérats et brèches, grès, silts) (figure 5).
- Ces faciès gréseux ont un degré de perméabilité assez importante (à cause de leur porosité) et possèdent des réservoirs appréciables. Leur potentiel aquifère n'est pas négligeable. C'est d'ailleurs dans les bassins gréseux que les étiages sont plus soutenus : ils sont supérieurs à $4m^3/s$ à Coubéri ; à $0,63m^3/s$ à Gbassè (Lessard, 1964 ; Le Barbe *et al.*, 1993).

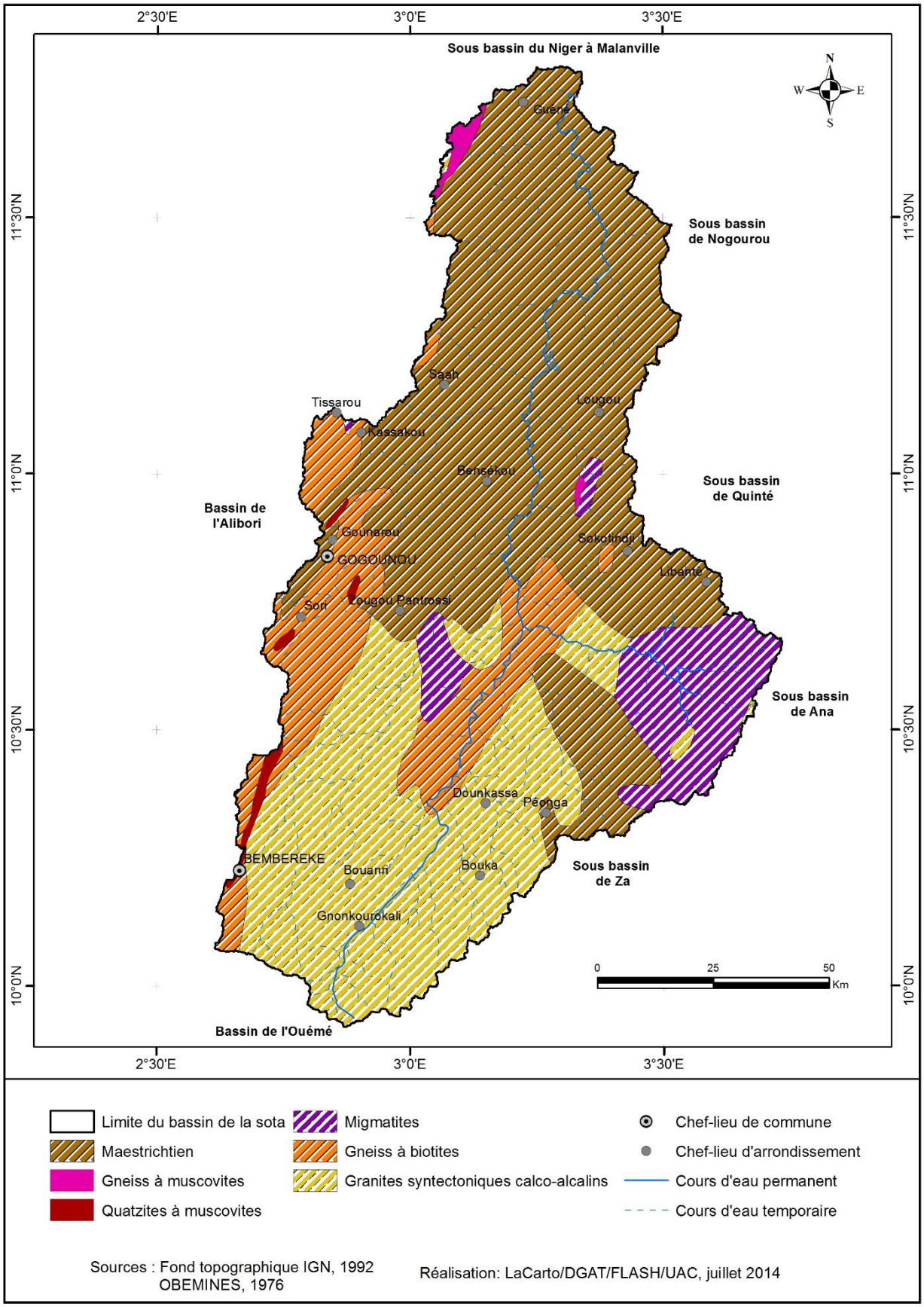


Figure 5 : Formations géologiques du bassin versant de la Sota

2.2.3 Formations pédologiques

Le manteau pédologique résulte généralement de l'action combinée de plusieurs facteurs : le climat, les formations végétales, la nature et l'altération du substratum géologique, mais aussi et surtout, de l'action anthropogénique. Quant à son aptitude culturale, elle dépend essentiellement de sa capacité de rétention en eau, elle-même fonction de sa granulométrie ou de sa texture, et de sa teneur en matière organique (Roose, 1981 ; Eschenbrenner, 1970, 1988 ; cité par Noufe, 2011).

Dans le bassin de la Sota, les matériaux originels constituants les sols ont des origines variées. II s'agit, soit de matériau d'apport d'origine alluviale ou colluviale récent, soit de matériau sédimentaire ancien, soit de matériau d'altération dérivant du socle granito-gneissique sous-jacent (Viennot, 1978).

- **Matériaux d'apport récents**

Les matériaux colluviaux transportés par gravité sur de courtes distances sont plus particulièrement abondants au pied des accidents topographiques majeurs: falaises de grès du Crétacé ou du Continental terminal, collines ou chaînons de grès quartzites de l'Atacorien. Les caractéristiques de ces matériaux sont proches de celles des zones de départ ; texture le plus souvent sableuse ou grossière.

Les matériaux alluviaux ont subi un transport sur de longues distances. II y a eu ainsi mélange de divers matériaux et tri granulométrique au moment du dépôt. Les alluvions sont affectées par une hydromorphie d'origine topographique.

- **Matériaux sédimentaires anciens**

Ce sont d'anciens dépôts continentaux très évolués ayant subi après leur mise en place une nouvelle lithogenèse. Sur ces dépôts il est difficile de percevoir une nouvelle pédogenèse.

Le dépôt d'âge crétacé a une texture sablo-argileuse, les limons sont rares, l'argile presqu'uniquement kaolinique a une faible capacité d'échange. Le dépôt attribué au Continental termina1 a une texture plus équilibrée, la capacité d'échange de l'argile est plus élevée, les oxydes de fer peuvent dans certains niveaux constituer un véritable minerai de fer. Le dépôt appartenant au Buem (primaire) est riche en limons, pauvre en

oxyde de fer. II comporte des niveaux quartzeux résistants à l'altération qui fournissent les cailloux de quartz fréquemment observés.

- **Matériaux d'altération**

Certains matériaux d'altération sont peu épais et à évolution minéralogique peu poussée : ils ont une épaisseur réduite et se situent en position topographique ne favorisant pas une évolution poussée des minéraux. Leurs caractéristiques sont liées à la roche mère. D'autres matériaux d'altération sont épais et à évolution minéralogique poussée : ils ont une épaisseur supérieure à deux mètres (souvent plus de dix mètres) et sont situés en zone haute où le drainage externe est assuré. Les minéraux de la roche sont altérés, il y a formation de kaolinite, mais la gibbsite n'apparaît pas.

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

Les sols faiblement ferralitiques se développent sur les formations gréseuses plus ou moins ferruginisées dans la région de Kandi. Ils ont une teneur en argile de 10 à 40 % et un bon indice d'érodibilité de 0,07 en surface, mais qui s'accroît en profondeur (0,1 à 0,2). Avec une perméabilité moins bonne par rapport à celle du Continental terminal, ils ont une réserve hydrique de l'ordre de 60 mm par mètre de profondeur. Ces sols sont peu profonds et cuirassés (sols formés par le processus d'induration des horizons d'accumulation suite à l'alternance de détrempe et de dessiccation). En dépit de leurs conditions physiques médiocres, la plupart de ces sols offrent d'assez bonnes propriétés chimiques, d'où leur intense exploitation pour les cultures (Agli, 1995 cité Vissin, 2007).

Les sols hydromorphes, sols à pseudogley (rencontrés dans les vallées et les bas-fonds), le plus souvent de texture sableuse à sable grossier, sont des sols grumeleux ou grumelopolyédriques en surface, avec un indice d'instabilité structurale < 1. Cependant, au-delà de 20 cm de profondeur, cet indice est supérieur à 1,5. Ce sont en général des sols profonds (> 1 m) avec une perméabilité moyenne en surface de l'ordre de 13-4 et

10-6 m/s. En profondeur, cette perméabilité est comprise entre 3-6 et 16-6 m/s. Leur érodibilité est moyenne, avec une valeur comprise entre 0,1 et 0,2. Les sols hydromorphes sont alluviaux et riches, favorables à la culture du riz. Leur évolution dépend de l'eau pluviale et de la remontée de la nappe phréatique (Le Barbe *et al.*, 1993). Selon les sites, la réserve hydrique est de l'ordre de 75 ou 100 mm à un mètre de profondeur.

Les sols ferrugineux tropicaux, localisés sur le socle, sont caractéristiques d'un régime pluviométrique unimodal. Ils sont marqués par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes que celles des sols ferralitiques. Ce sont des sols peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. Leur faible épaisseur, sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence de nappe phréatique.

Toutefois, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère (Boko, 1992). La figure 6 présente les formations pédologiques du bassin de la Sota.

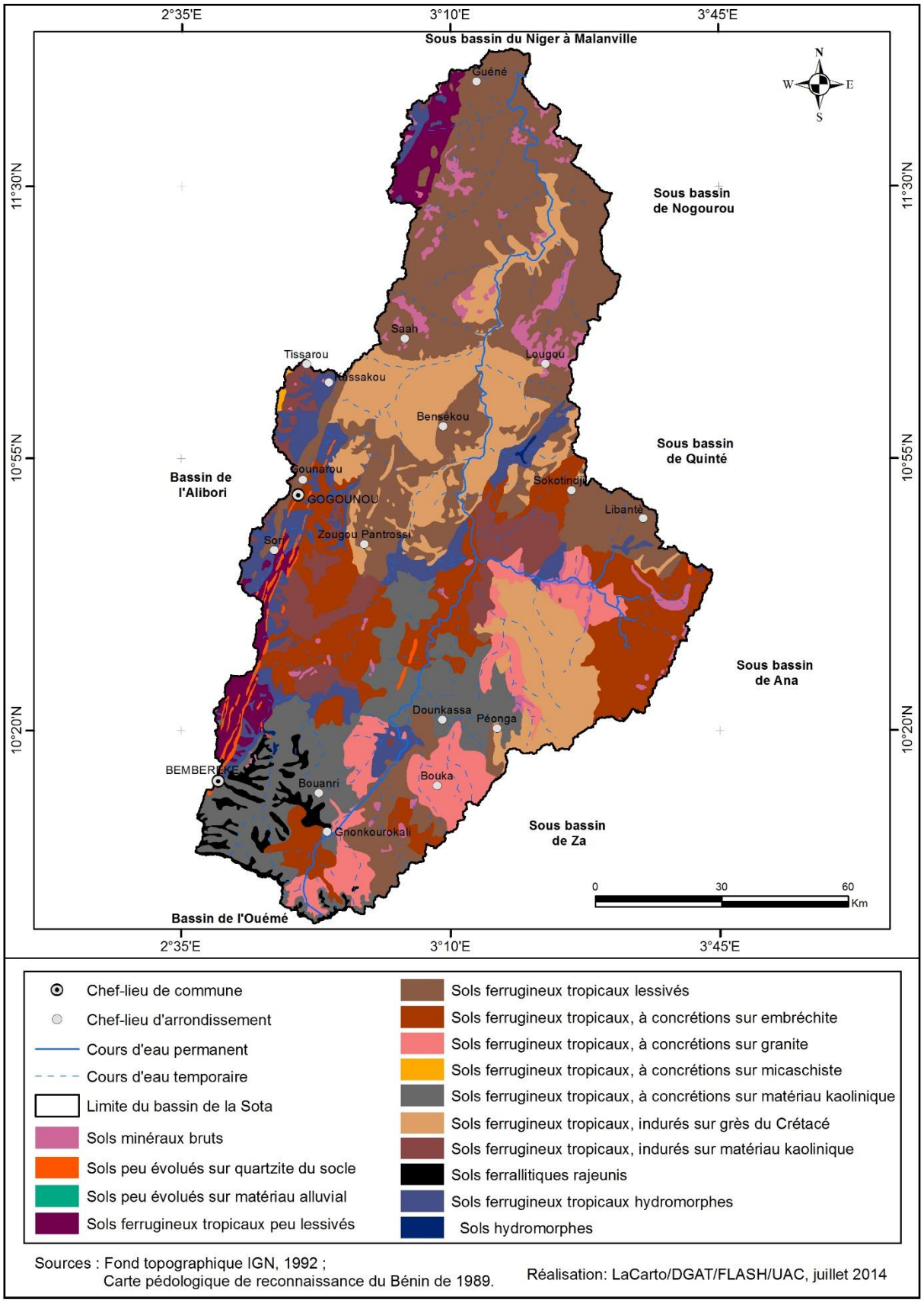


Figure 6 : Formations pédologiques du bassin de la Sota

2.2.4 Relief

L'altitude du relief dans le bassin de la Sota est généralement inclinée du sud vers le nord dans ce domaine qui s'étend sur les formations gréseuses et sur celles du socle. Ce bassin est constitué des plateaux inclinés présentant des altitudes variant entre 125 m et 450 m, avec une moyenne de 296 m (Vissin, 1998). Ces plateaux sont drainés par un cours principal long de 254 km. La partie sud est dominée par la pénéplaine dahoméenne, unité de relief dont deux éléments marquent le paysage :

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

2.2.5 Formations végétales

La répartition des différentes formations végétales naturelles sur la zone d'étude tient à leur situation topographique et à leur affinité hydro-pédologique.

Le bassin-versant de la Sota abrite les forêts classées de Goungoun (73 476 ha), de la Sota (53 678 ha) et des Trois Rivières (265 595 ha) (CENATEL, 1998).

La végétation dans l'ensemble du bassin de la Sota, devient progressivement plus clairsemée du sud vers le nord. Ainsi, dans le sud, il y a la savane arborée qui comprend en général un ensemble assez dense d'arbres pouvant atteindre dix mètres, avec une importante strate d'arbustes et un tapis de graminées s'opposant au ruissellement. La taille et la densité des arbres décroissent vers le nord (Le Barbé *et al.*, cité par Vissin 2007). Sur les grès de Kandi se développent des savanes arborées et des savanes arbustives à *Adansonia digitata, Combretum glutinosum, Combretum collinum,*

Combretum nigricans, *Terminalia avicennioides, Terminalia laxiflora, Tamarindus indica* (de Souza, 1988 ; CNRSS, 1973 cité par Vissin, 2007). Dans les savanes boisées, on retrouve *Daniellia oliveri, Lannea velutina*. Les forêts claires sont composées des espèces telles que *Isoberlinia doka, Isoberlinia tomentosa, Bombax costatum.* Quant aux graminées, elles sont sous l'emprise des activités pastorales. Le long des cours d'eau, se développe une galerie forestière caractérisée par des espèces telles que : *Khaya senegalensis, Khaya grandifolia, Diopyros mespiliformis, Afzelia africana.*

2.2.6 Contexte climatique du bassin de la Sota (BVS)

2.2.6.1 Circulation générale en Afrique de l'Ouest

La zone intertropicale constitue une entité assez caractéristique sur le plan de la circulation des « masses d'air » en présence. Cette circulation intervient en partie dans la définition du climat d'une région, et constitue ainsi non seulement le facteur dominant de la mise en place des paysages, mais aussi le facteur dominant des régimes hydroclimatiques (Lienou, 2007).

Selon le modèle de circulation générale à 3 cellules convectives (figure 5), le régime climatique de l'Afrique de l'Ouest est déterminé par la cellule de Hadley (Gallée *et al.*, 2004). Il s'agit d'une cellule thermique caractérisée par une expansion ascendante près de l'équateur météorologique et divergeant en altitude vers les pôles. Cette zone convective crée une région de basses pressions, appelée Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). En Afrique de l'Ouest, elle est encadrée par les anticyclones des Açores et de Sainte Hélène, respectivement au nord et au sud de l'équateur météorologique. En réaction, des courants de subsidence appelés alizés, à 30° de latitude, convergent en surface vers l'équateur. Au niveau de la mer, les alizés se dirigent vers la zone très instable de convergence intertropicale. Dans leur trajet vers l'équateur, ils absorbent chaleur et humidité. Sous l'effet combiné de cette convergence et des nombreux courants convectifs de cette région, l'air humide et instable de la zone intertropicale est projeté en altitude. D'importants cumulonimbus se développent, dont les sommets dépassent parfois la tropopause et atteignent 18 000 m. La genèse de ces nombreux systèmes précipitants convectifs forme la "mousson africaine". La ZCIT, particulièrement bien marquée sur la moitié occidentale de l'Afrique, sépare la mousson

du sud-ouest (anticyclone de Ste Hélène), chaude et humide, de l'harmattan, vent saharien très sec et plus chaud encore, à forte composante est (anticyclones des Açores). La mousson reste dans les basses couches, rejetant l'air saharien en altitude et créant ainsi une instabilité frontale appelée Front Inter Tropical (FIT). La position de la dépression équatoriale suit le mouvement apparent du soleil, il en résulte une oscillation saisonnière de la ZCIT autour de l'équateur géographique. Plusieurs facteurs influencent le déplacement de la ZCIT, mais c'est en août qu'elle occupe sa position la plus septentrionale (Sultan *et al.*, 2003 ; Sultan et Janicot, 2003). Sur le continent, la position de la ZCIT marque la limite de pénétration de la mousson. Il existe un découplage entre les pluies maximales et la position en surface de la ZCIT. Bien que l'oscillation interannuelle de la ZCIT conserve une position relativement stable (étude sur 8 ans), celle des précipitations connaît des déplacements importants (Grist et Nicholson, 2001). Le passage au sol du FIT détermine la saison des pluies et celle-ci est d'autant plus tardive et brève que l'on se déplace vers le nord (figure 7).

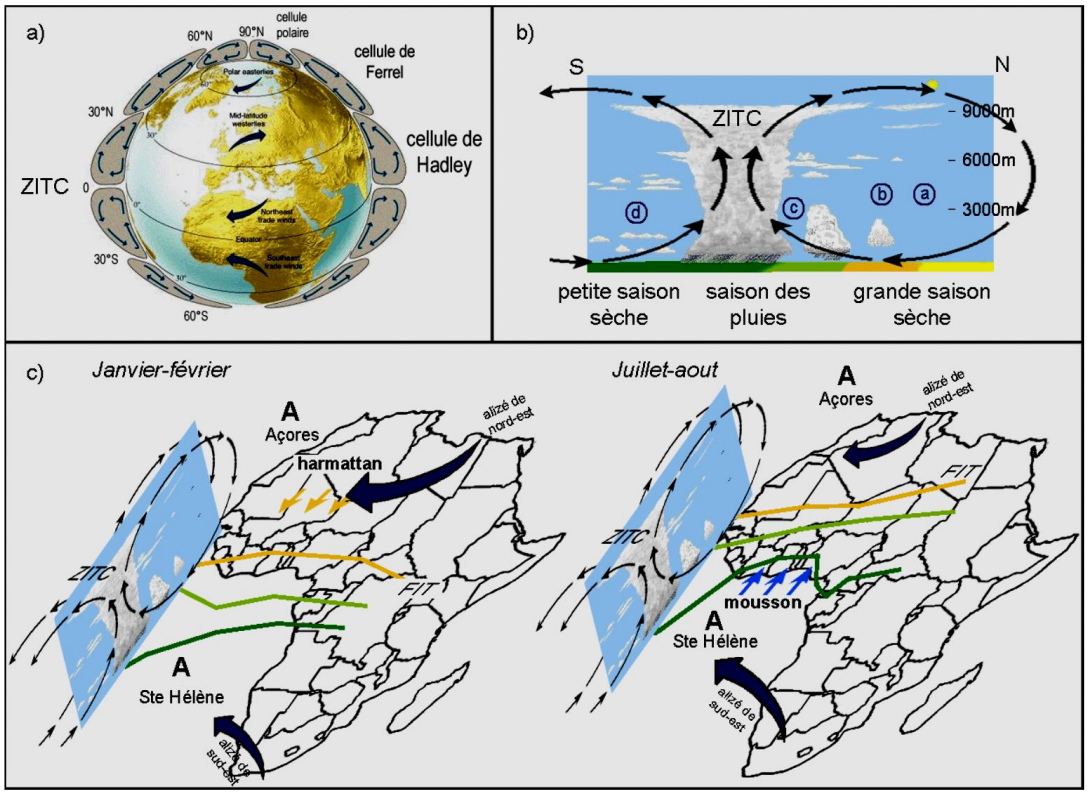


Figure 7 : Circulation générale et mousson ouest africaine

a) modèle de circulation générale;
b) position au sol des saisons; c) schéma du fonctionnement atmosphérique général sur l'Afrique de l'Ouest en saison sèche et en saison des pluies. (Modifiée d'après Lombry, 2000)

La mousson ouest-africaine est le résultat d'interactions complexes intervenant à différentes échelles. Sa variabilité a des origines diverses. Les conséquences sur la pluviométrie sont particulièrement importantes dans les régions soudaniennes, du fait de sa position septentrionale par rapport à l'avancée du FIT sur le continent. Depuis 1950, une diminution significative des circulations de l'évolution de la température océanique est actuellement admise comme participant activement à la variabilité de la mousson ouest africaine (Nicholson, 2001). La modification du gradient de température entre océan et continent (moteur de la mousson) et la perturbation des flux de vapeur océanique ascendants influencent le déplacement de la cellule convective (Vizy et Cook, 2002 ; Giannini *et al.*, 2003).

La dynamique atmosphérique est un facteur important de contrôle de la pluviométrie. Cependant le comportement humain lié aux activités économiques à grande échelle, peut aussi avoir une influence non négligeable. Charney (1975) avait souligné qu'une surexploitation des sols entraînait une augmentation de l'albédo au Sahel avec un impact direct sur la circulation de Hadley. Plus récemment, Zheng et Eltahir (1998) insistent sur le fait qu'une diminution importante du couvert végétal sur la région soudano-guinéenne peut avoir une influence non négligeable sur les précipitations de la même région.

Dans le bassin versant de la Sota, les phénomènes pluviogènes liés à la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest ont créé le climat tropical de type soudanien (Boko, 1988 ; Adam et Boko, 1993). Ce climat est caractérisé par une saison sèche d'octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à septembre (figure 6). La moyenne interannuelle des précipitations de 1965 à 2004 dans le bassin est de 1 036 mm à Coubéri et 1 083 mm à Gbassè.

Plusieurs auteurs ont examiné l'importance du climat pour les écosystèmes et la vie agricole au Bénin. Boko (1988) a montré que les fluctuations climatiques et les "chocs climatiques" ébranlent le système économique et social. Sircoulon (1990) et Afouda (1990) rapportent aussi que la dynamique du climat entraîne des bouleversements écologiques et génère une modification des systèmes culturaux.

Considérant l'importance des effets rétroactifs de méso-échelle entre les systèmes précipitants convectifs et l'humidité du sol (Clark *et al.*, 2004), des hypothèses ont été

formulées selon lesquelles les changements environnementaux anthropiques (dégradation des surfaces et désertification) ont contribué significativement à la baisse de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. Ce processus serait vraisemblablement confiné à des échelles relativement faibles, tandis que les indices actuels montrent que les changements environnementaux à grande échelle sont largement plus contrôlés par les variations naturelles du climat, que par les modifications anthropiques des sols (Nicholson, 2001). Sur l'Afrique de l'Ouest, une influence significative d'El Nino sur le régime climatique n'a jamais été réellement mise ne évidence (Nicholson *et al.*, 2000). La circulation générale de l'atmosphère au-dessus de l'Afrique de l'Ouest dépend à la fois des hautes pressions tropicales l'anticyclone des Açores, celui de Sainte-Hélène et l'anticyclone égypto-libyen (Boko, 1988 ; Agli, 1995 ; Houndenou, 1995 et 1999 cité par Vissin, 2007) et de l'équateur météorologique dont les migrations saisonnières déterminent les caractéristiques des flux d'air et les types de temps résultants.

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

Des résultats de ces travaux, il ressort que dans cette région, la circulation atmosphérique à grande échelle est dominée par les circulations cellulaires de types Hadley et Walker. Celles-ci se manifestent par l'alternance saisonnière sur la région de vents de deux directions opposées : les alizés de secteur NE et la mousson de SW qui confluent le long de l'Equateur Météorologique (EM) formant la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT).

2.2.6.2 Bilan climatique

Le bilan climatique est établi à travers une combinaison des précipitations et de l'évapotranspiration (ETP). L'ETP permet d'exprimer la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par une formation végétale couvrant bien le sol, en phase active de croissance et alimenté en eau de manière optimale (Trochain *et al.*, 1980). Selon Franquin (1986), le bilan climatique permet de diviser l'année en des périodes bioclimatiques successives correspondant à des périodes de développement végétatifs que sont : la période sèche, la période pré-humide, la période humide et la période post-

humide. Les figures 8 et 9 présentent les diagrammes climatiques des stations de Kandi et de Parakou.

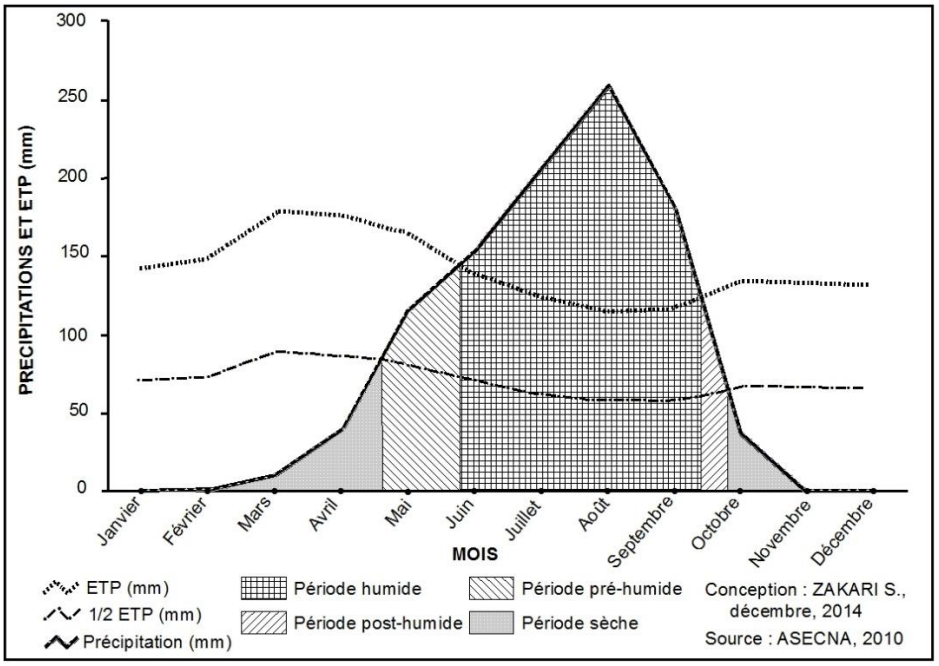


Figure 8 : Diagramme climatique de Kandi (1965-2010)

Source : ASECNA, 2010

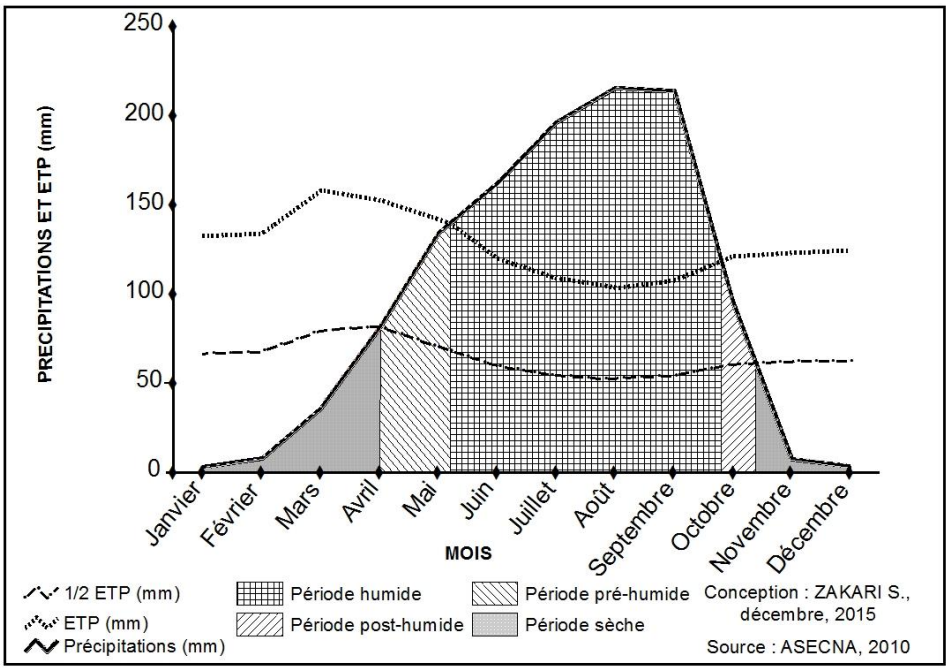


Figure 9 : Diagramme climatique de Parakou (1965-2010)

Source : ASECNA, 2010

En appliquant la subdivision périodique de l'année de Franquin au bilan climatique des stations de Kandi et de Parakou (figure 8 et 9) on en déduit que :

- la période humide s'étend de fin-mai à mi-septembre ;
- la période pré-humide de fin-avril à fin-mai ;
- la période post-humide de mi-septembre à fin septembre ;
- la période sèche, de fin-septembre à fin-avril.

La période active de la végétation est la période durant laquelle la pluviosité P est supérieure ou égale à ½ ETP ; la réserve en eau du sol restant supérieure à celle du point de flétrissement (Houinato, 2001). Elle se situe à la station de Kandi de fin-avril à fin-septembre. La période de la grande croissance ou la période optimale de la végétation est la période au cours de laquelle la pluviosité P est supérieure à l'ETP (Djego, 2006) ; la végétation ne souffre d'aucune limitation pour son alimentation hydrique et minérale, dans la région de Kandi, il s'agit de la période allant de fin-mai à mi-septembre. Ces périodes active et optimale sont favorables au développement de la végétation.

A la station de Parakou, la période humide s´étend de début mai à fin-septembre. Elle est la plus pluvieuse et le pic des précipitations est atteint au mois d'août. La période post-humide apparaît assez courte (fin-septembre à début octobre) comparée à la période pré-humide qui s'étend du début avril à début mai.

2.2.6.3 Températures

En milieu tropical, la température est importante pour les écoulements des bassins versants (Ozenda, 1982). Les températures moyennes annuelles enregistrées dans les stations de Kandi et de Parakou au cours de la période (1965 à 2010) oscillent autour de 27,54° C (figure 10).

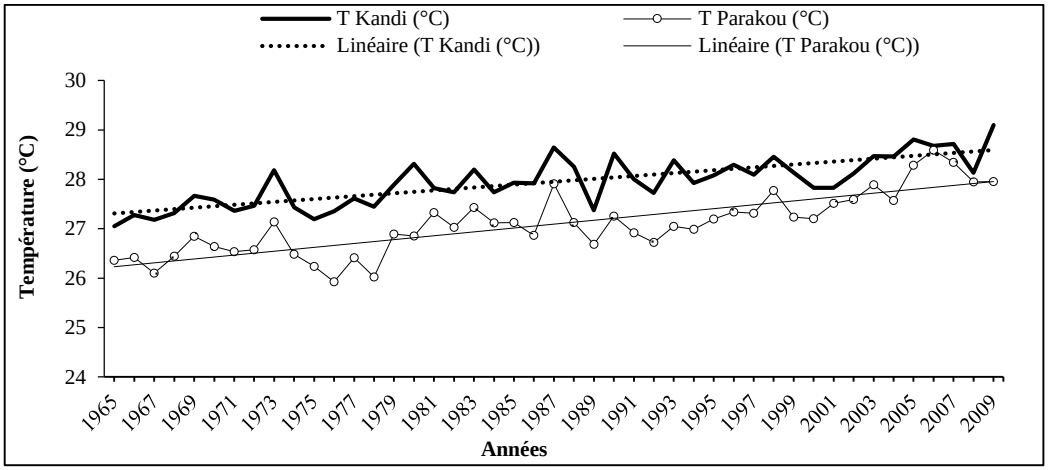


Figure 10 : Variation interannuelle de la température moyenne de 1965 à 2010

Source : ASECNA, 2010

A la station synoptique de Kandi, la température moyenne annuelle est de 27,97 °C, les valeurs extrêmes (29,09 °C) sont enregistrées en 2009 entre mars et avril, alors que les minima (27,37 °C) sont notées en 1989 de décembre à janvier (figure 8). A Parakou par contre, la plus forte température (28,59 °C) est enregistrée en 2006 et la plus faible (25,92 °C) en 1976. Globalement on observe une tendance à la hausse de la température entre 1965 et 2010 dans le bassin versant de la Sota.

2.2.6.4 Insolation

Le secteur d'étude appartient au bassin béninois du fleuve Niger où les valeurs moyennes mensuelles de l'insolation en heures par mois sont récapitulées dans le tableau V. Comparée aux autres régions du pays, cette région a les plus fortes durées d'insolation pendant tous les mois de l'année (Le Barbe *et al.*, 1997).

Tableau V : Variation mensuelle de l'insolation (en heure) entre 1965 et 2010 dans les stations de Kandi et de Parakou

Mois	Kandi	Parakou
Janvier	273	252
Février	253	237
Mars	253	238
Avril	251	232
Mai	266	234
Juin	249	189
Juillet	216	141
Août	191	119
Septembre	206	146
Octobre	269	209
Novembre	280	250
Décembre	278	251
Total	**2987**	**2500**
Moyenne	**249**	**208**

Source : ASECNA, 2010

De l'examen du tableau I, il ressort qu'à Kandi, la moyenne mensuelle de l'insolation est de 249 h pour un total annuel de 2 987 h. Le mois de novembre se révèle le plus ensoleillé avec 280 h d'insolation, tandis que le mois d'août se révèle le moins ensoleillé avec 191 h d'ensoleillement. A Parakou la moyenne annuelle de l'insolation est de 208 h pour un total d'ensoleillement annuel de 2 500 h. Le mois de janvier reste le plus ensoleillé (252 h) et le mois d'août apparaît comme le moins ensoleillé (209 h).

Dans l'ensemble, on remarque que Kandi est plus ensoleillé que Parakou. De plus, les durées maximales d'insolation correspondent à la saison sèche et les minimales sont atteintes en saison pluvieuse à Kandi comme à Parakou.

2.2.6.5 Vents

Les vents favorisent la dissémination des diaspores de certaines espèces et peut accentuer les chablis et la propagation des feux de végétation. Ils sont des agents de transport des masses d'air humide, fondamentale pour l'explication de la distribution des pluies (Lebrun, 1947). Il est important de connaître donc les types de vents qui balaient le secteur d'étude. Le système de circulation des vents est dominé par l'alizé maritime qui souffle d'avril à novembre dans la direction SW-NE.

L'harmattan souffle dans la direction NE-SW de novembre à mars. Sa vitesse moyenne est de 2 m/s. Sa vitesse maximale atteint 14 m/s. Il accentue les conditions d'aridité de la saison sèche.

Tableau VI : Variation de la vitesse du vent (m/s) sur la période de 1965 à 2010 à Kandi et à Parakou

Mois	Kandi	Parakou
Janvier	2	2
Février	3	1
Mars	2	3
Avril	1	1
Mai	3	2
Juin	1	1
Juillet	2	2
Août	1	2
Septembre	2	2
Octobre	1	2
Novembre	2	1
Décembre	2	2
Moyenne	**2**	**2**

Source : ASECNA, 2010

De l'observation du tableau VI, il ressort que la vitesse moyenne du vent est de 2 m/s dans les deux stations. Toutefois, on remarque à Kandi la plus forte vitesse (3 m/s) du vent est enregistrée dans les mois de février (moi dans lequel l'harmattan s'accentue dans ce milieu) et de mai (mois des vents violents des premières pluies en l'occurrence), alors que la plus faible vitesse du vent est observée dans les mois d'avril, juin, août et octobre. A la station de Parakou par contre, le vent le plus fort est enregistré en mars et le plus faible dans les mois de février, avril, juin et novembre.

2.3 Cadre humain

2.3.1 Evolution démographique du bassin de la Sota (BVS)

La connaissance des données socioculturelles et démographiques est fondamentale dans l'étude de l'évolution des bassins versants dans un contexte des changements climatiques.

Avec une croissance moyenne de 4,11 % en moyenne, le bassin versant de la Sota comptait au recensement général de la population et de l'habitation (RGPH1) de 1979

un total 243 987 habitants. Cet effectif de la population est passé à 411 619 habitants en 1992 (RGPH2). Au RGPH3 en 2002, on a compté 623 343 habitants pour le bassin de la Sota, cette population passe à 997 201 habitants au RGPH4 de 2013 soit une augmentation de 373 858 habitants (59,98 %) en ces deux derniers recensements. Une projection en 2050 laisse remarquer que la population du bassin atteindra les 4 167 072 habitants. La figure 11 présente les différentes évolutions opérées par commune du bassin.

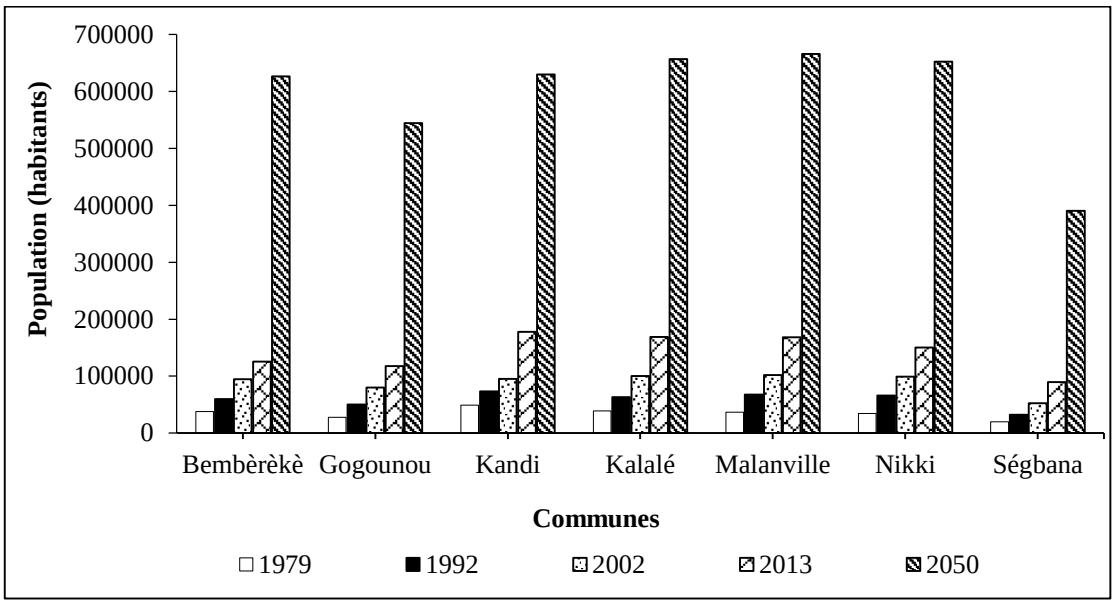


Figure 11 : Evolution de la population du bassin de la Sota

Source : INSAE, RGPH 1, 2, 3, 4

De l'examen de la figure 11 indique toutes les communes du bassin connaîtront une hausse exponentielle de leur population en 2050. Les communes à forte croissance démographique selon le RGPH4 sont celles de Kandi (177 683 habitants) ; Kalalé (168 520 habitants) et Malanville (168 006 habitants). La même tendance est observée au niveau des recensements précédents de 1979 ; 1992 et de 2002, elle restera idem en 2050.

Cette force démographique entraine le développement de divers pôles d'activités économiques et la surexploitation des ressources naturelles du bassin versant de la Sota. Cette population est formée d'une pluralité de groupes sociolinguistiques, inégalement répartis. Les principaux sont les Baatonu (32,6 %), les Fulbé (22,1 %), les Dendi (18,2

%), les Mokollé (4 %) et les religions dominantes sont l'Islam (77 %), le christianisme (8,7 %), et l'animisme (4 %) (INSAE, 2008).

2.3.2 Activités socio-économiques dans le bassin versant de la (BVS)

Les activités économiques pratiquées regroupent tous les secteurs d'activités dont le plus important reste aujourd'hui le secteur primaire. L'agriculture, l'élevage et la pêche sont ainsi les principales activités du secteur primaire dans le bassin.

2.3.2.1 Agriculture

L'activité principale des populations riveraines du bassin de la Sota est l'agriculture qui occupe presque la totalité de la population (figure 12). Il s'agit d'une agriculture de subsistance avec une prédominance des cultures vivrières dont les plus importantes sont le sorgho (*Sorghum bicolor*), le mil (*Pennisetum glaucum*), le maïs (*Zea mays*), le niébé (*Vigna unguculata*), l'igname (*Dioscorea* spp.) et le riz (*Oryza sativa*). Ces cultures sont associées à d'autres telle que les oléagineux (arachide : *Arachis hypogaea*), les légumineux et potagers (oignons : *Allium sepa*). Cette agriculture vivrière, est pratiquée avec les techniques rudimentaires qui entraînent des effets néfastes sur les écosystèmes. L'agriculture industrielle porte essentiellement sur le coton qui bénéficie d'un appui technique particulier de la part de l'Etat. Le coton est la principale culture de rente et nécessite de vastes espaces et de techniques culturales qui ont des impacts néfastes sur les écosystèmes. Elle est la première source de revenus monétaires de ces populations. Les autres cultures vont permettre de voir les tendances de la production agricole et ses impacts sur les écosystèmes. En définitif, le développement des cultures vivrières et de rente assurent aux populations la subsistance et l'essentiel des revenus mais contribuent à la destruction des écosystèmes.

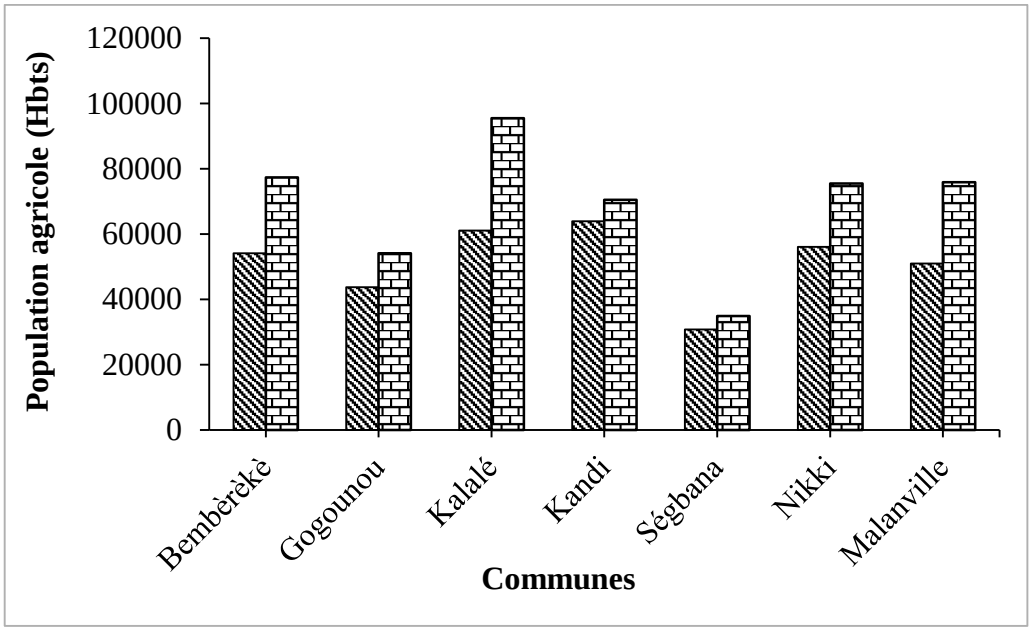


Figure 12 : Evolution de la population agricole par Commune en 1992 et 2012

Source : INSAE, RGPH 2(1992) et 4(2012)

2.3.2.2 Elevage

Le cheptel dans le bassin de la Sota, est constitué surtout de bovins, d'ovins, de caprins, porcins, asins et de volailles. L'élevage dans le bassin de la Sota est peu organisé, de mode extensif traditionnel, et constitue souvent une activité secondaire pour quelques individus. La commune de Ségbana occupe sur le plan national, la quatrième place dans la production bovine (7,5 %) et la première dans la production porcine (65 %) (Monographie Ségbana, 2006). L'élevage non conventionnel (lapins, aulacodes) se pratique en petit élevage et chez très peu de privés. La forte demande en viande, l'existence d'un cadre institutionnel pour les éleveurs et les revenus qu'il procure font de l'élevage conventionnel un secteur d'avenir. Aussi, des structures locales comme la CLCAM (Caisse Locale de Crédit Agricole Mutuel), mobilisent l'épargne locale provenant de la vente du bétail mais aussi du coton. La forêt classée des trois rivières est un atout d'un point de vue environnemental, mais son caractère protégé fait d'elle une contrainte pour les producteurs à la recherche de terres cultivables et de pâturage (Monographie Kalalé, 2006).

Les systèmes d'exploitation des pâturages naturels sont le système transhumant, caractérisé par une grande mobilité et une faible association à l'agriculture et le système sédentaire associé à l'agriculture de subsistance ou de rente et s'observe aux alentours

des agglomérations et des aires de campement (Vodounnon, 2010). L'élevage conventionnel, malgré l'existence de points d'eau, l'abreuvement du bétail pose des problèmes surtout en saison sèche. D'autre part, les pratiques agropastorales contribuent à la déforestation, à l'appauvrissement des sols, à la mauvaise gestion du pâturage, ce qui pose un problème de durabilité écologique. L'inexistence ou la mauvaise délimitation de couloirs de passage favorise la divagation des animaux, source de conflits réguliers entre agriculteurs et éleveurs. Tous ces problèmes liés à l'élevage dans le bassin de la Sota sont tout autant des contraintes à la production agricole.

Conclusion partielle

En somme les chapitres 1 et 2 de la présente thèse précisent les préoccupations de recherche relatives à la vulnérabilité des parcours naturels face aux effets des changements climatiques dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Couberi. La situation du secteur d'étude en zone de transition soudano-sahélienne et de transhumance bovine est source de vulnérabilité aux changements climatiques.

Les techniques appropriées ont été utilisées pour la cartographie numérique à base d'images satellites pour la simulation des dynamiques spatiales et temporelles des changements d'occupation et d'utilisation des sols, pour l'inventaire des espèces ligneuses et la modélisation de de leur distribution, pour l'évaluation de la vulnérabilité des parcours naturels à l'horizon 2050.

DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUES HYDROCLIMATIQUE ET D'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

La deuxième partie fait une analyse des dynamiques spatiales des terres de parcours naturels dans un contexte de changement climatique. Il s'est agi de modéliser le changement climatique et de déterminer les tendances évolutives de l'occupation du sol. Elle comporte deux chapitres : le chapitre 3 présente les dynamiques hydroclimatiques et le chapitre 4 décrit les dynamiques de l'occupation des terres.

CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Ce chapitre 3 aborde la variabilité pluviométrique, la variabilité des débits annuels et le bilan hydrométrique du milieu d'étude.

3.1 Variabilité pluviométrique

3.1.1 Champ moyen annuel des précipitations

La figure 13 présente les champs moyens annuels du bassin de la Sota de 1965 à 2010.

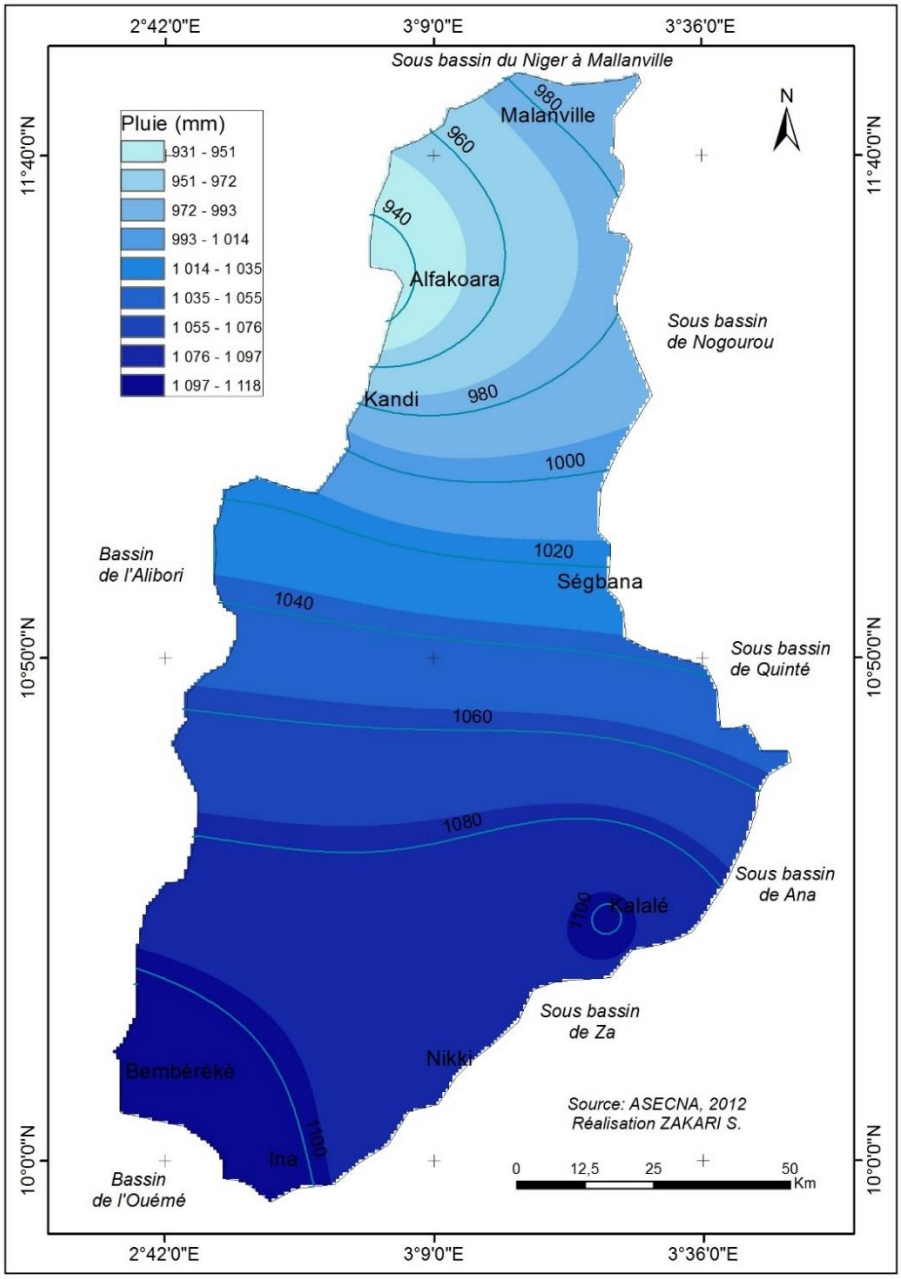
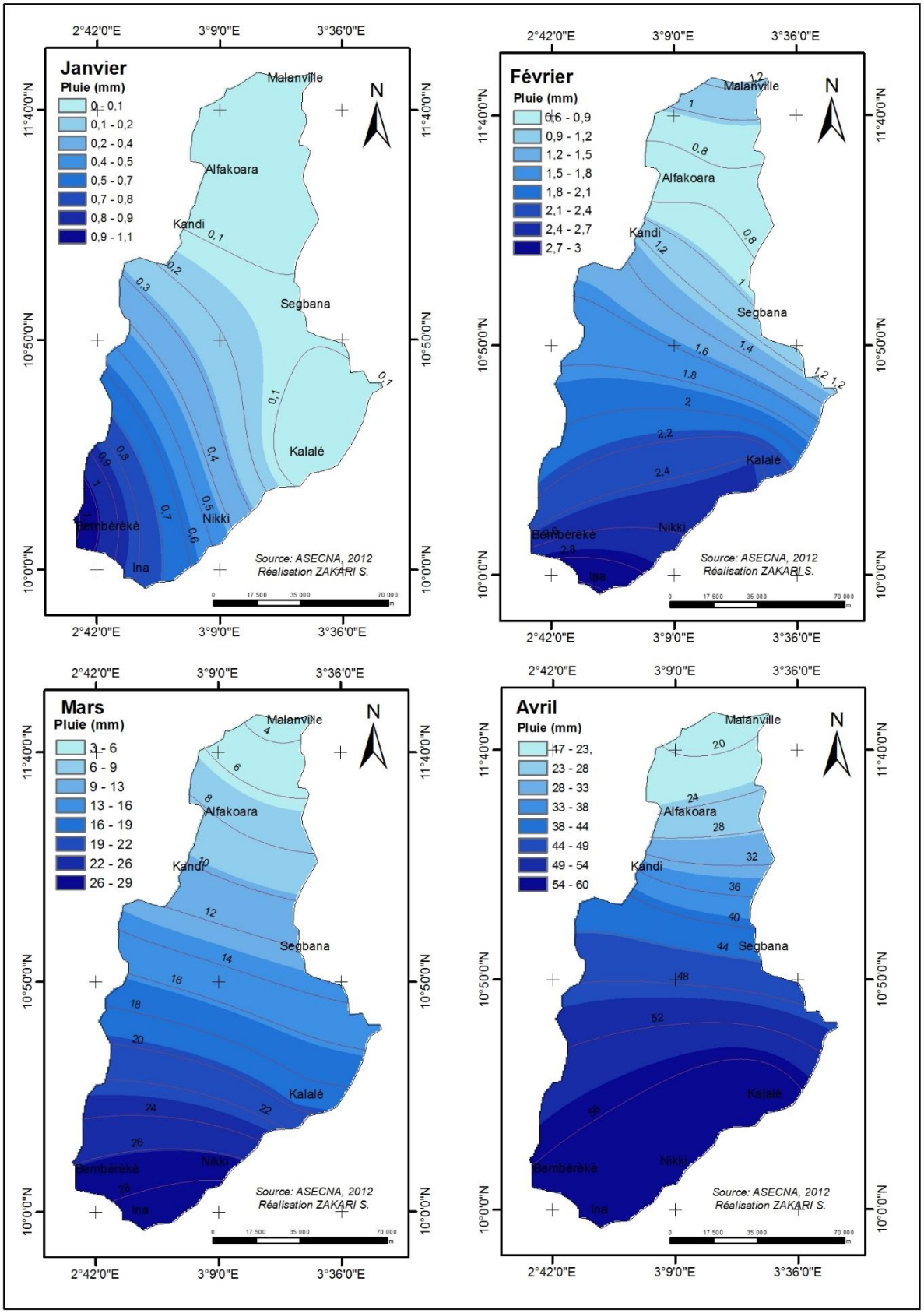


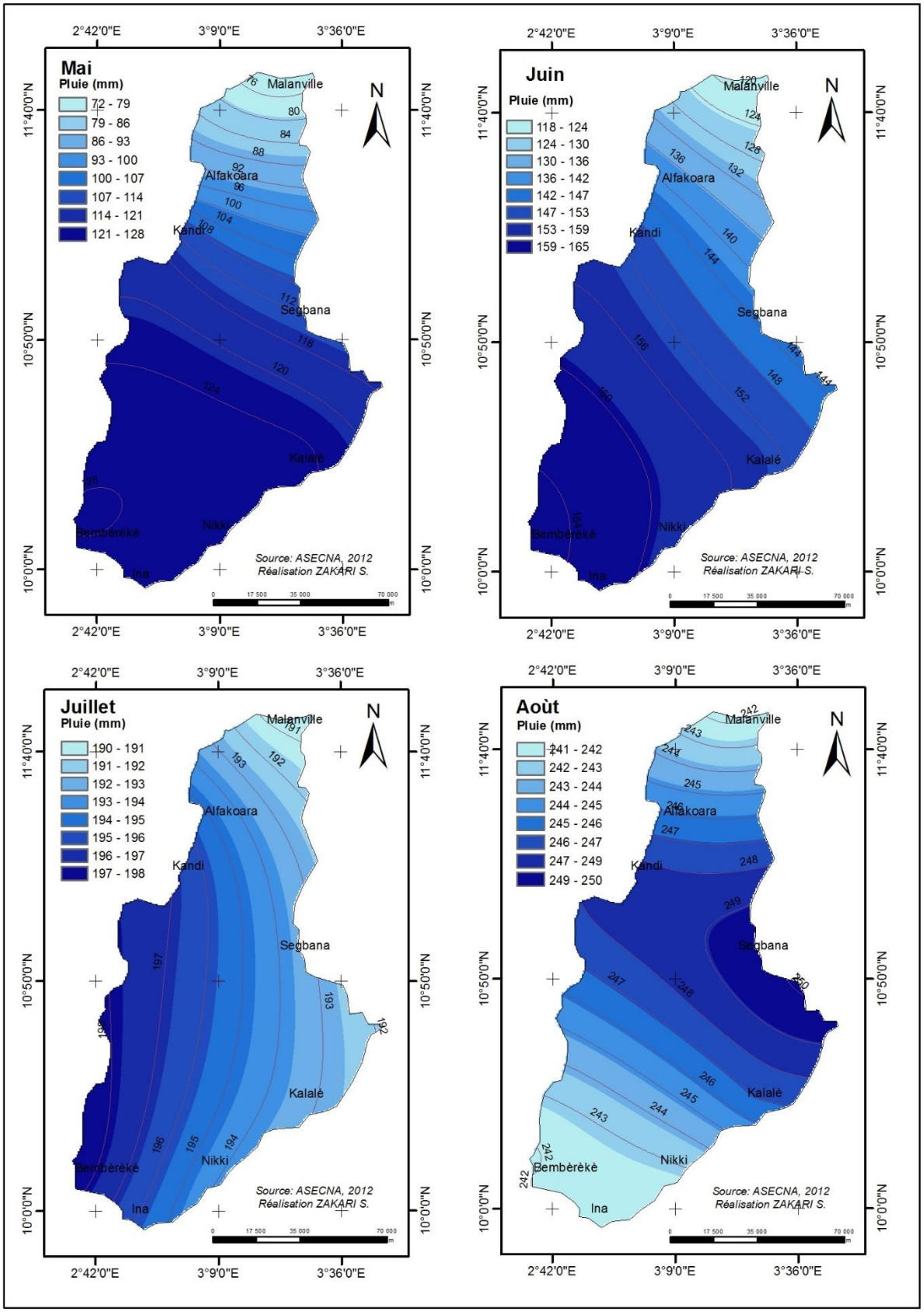
Figure 13 : Champ moyen annuel des précipitations

L’analyse de la figure 13 montre que la pluviométrie évolue dans un gradient sud-nord dans le bassin de la Sota. Ainsi, les secteurs les plus arrosés sont localisés au sud-ouest du bassin. Il s’agit des localités de la Commune de Bembèrèkè qui enregistre en moyenne 1100 mm de pluie par an. Par ailleurs, les localités de la Commune de Kalalé enregistrent la même moyenne annuelle. Par contre, les plus faibles valeurs pluviométriques sont observées au nord-ouest du bassin dans la localité d’Alfakoara.

3.1.2 Précipitations mensuelles moyennes

La figure 14 présente les champs de pluie moyens mensuels du bassin de la Sota de 1965 à 2010. L’examen de la figure 14 montre l’évolution des champs de pluies mensuels (1965-2010) dans le bassin de la Sota. Il ressort de l’analyse de la figure 14 que le gradient des précipitations se révèle être sud-nord au début et en fin d’année. On note une particularité pour le mois août pendant lequel la pluviométrie mensuelle est beaucoup plus importante au centre à l’est du bassin. Ainsi, la variation pluviométrique du champ moyen mensuel montre le découpage de l’année en deux grandes périodes : une saison humide (avril-octobre) et une saison sèche (novembre-mars) qui s’appliquent quasiment à l’ensemble du bassin versant au cours de la période 1965-2010.


Janvier
Pluie (mm)
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 0,4
0,4 - 0,5
0,5 - 0,7
0,7 - 0,8
0,8 - 0,9
0,9 - 1,1
Février
Pluie (mm)
0,6 - 0,9
0,9 - 1,2
1,2 - 1,5
1,5 - 1,8
1,8 - 2,1
2,1 - 2,4
2,4 - 2,7
2,7 - 3
Mars
Pluie (mm)
3 - 6
6 - 9
9 - 13
13 - 16
16 - 19
19 - 22
22 - 26
26 - 29
Avril
Pluie (mm)
17 - 23,
23 - 28
28 - 33
33 - 38
38 - 44
44 - 49
49 - 54
54 - 60
Malanville
Alfakoara
Kandi
Segbana
Kalalé
Nikki
Bembèrèkè
Ina
N
Source: ASECNA, 2012
Réalisation ZAKARI S.
2°42'0"E
3°9'0"E
3°36'0"E
11°40'0"N
10°50'0"N
10°0'0"N


Mai
Pluie (mm)
72 - 79
79 - 86
86 - 93
93 - 100
100 - 107
107 - 114
114 - 121
121 - 128
Juin
Pluie (mm)
118 - 124
124 - 130
130 - 136
136 - 142
142 - 147
147 - 153
153 - 159
159 - 165
Juillet
Pluie (mm)
190 - 191
191 - 192
192 - 193
193 - 194
194 - 195
195 - 196
196 - 197
197 - 198
Aoùt
Pluie (mm)
241 - 242
242 - 243
243 - 244
244 - 245
245 - 246
246 - 247
247 - 249
249 - 250
Malanville
Alfakoara
Kandi
Segbana
Kalalé
Nikki
Bembèrèkè
Ina
N
2°42'0"E
3°9'0"E
3°36'0"E
11°40'0"N
10°50'0"N
10°0'0"N
Source: ASECNA, 2012
Réalisation ZAKARI S.

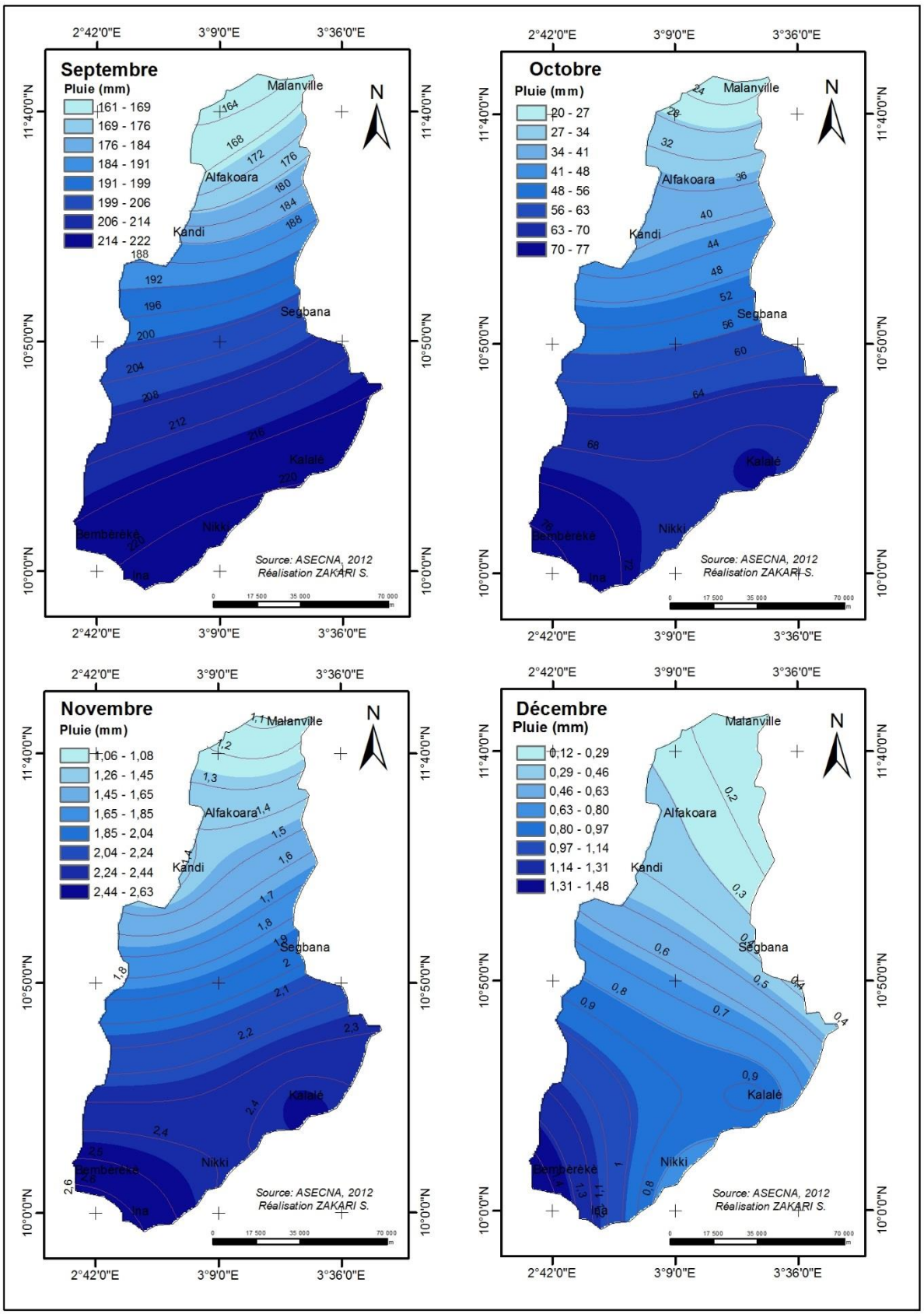


Figure 14 : Champs de pluie moyens mensuels (1965-2010)

3.1.3 Variabilité et tendance pluviométrique

Sur la période 1965-2010, la pluviométrie dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri est marquée par des fluctuations interannuelles très remarquables. La moyenne de la série est de 1028,20 mm. Son écart-type (93,44 mm) et son coefficient de variation (9,08 %) traduisent cette grande variabilité. On note une succession de phases excédentaires et de phases déficitaires (figure 15).

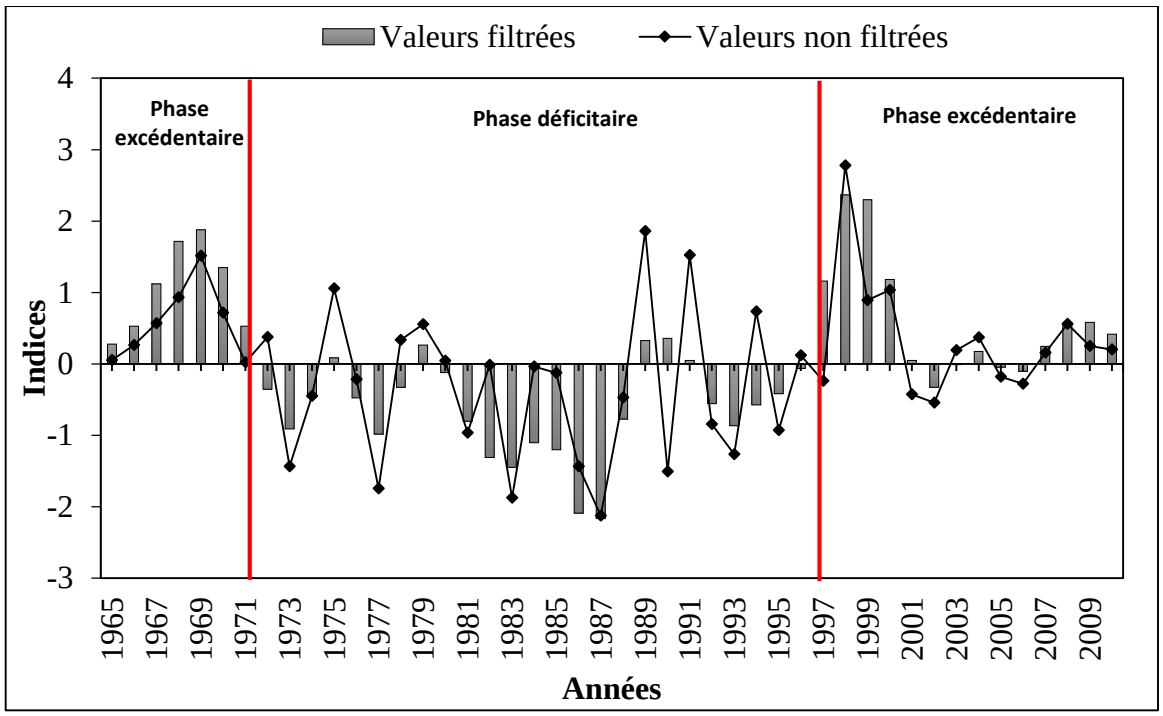


Figure 15 :Variabilité interannuelle des précipitations annuelles (1965-2010)

Source : ASECNA, 2010

La phase 1965-1971 a été excédentaire. La moyenne pluviométrique pour cette phase est 1082,53 mm. Au cours de cette phase, les années 1968 et 1969 ont été très pluvieuses avec respectivement 1115,22 mm et 1169,86 mm de pluie.

La phase 1972-1996 a été très déficitaire avec une moyenne pluviométrique de 995,17 mm. Les années 1983, 1986 et 1987 ont été particulièrement sèches avec respectivement 853,06 mm ; 893,96 mm et 829,58 mm de précipitation.

La phase 1997-2010 a été excédentaire avec une moyenne pluviométrique de 1060,01 mm. Les années 1998 et 1999 qui ont été particulièrement pluvieuses avec respectivement 1115,22 mm et 1169,86 mm de pluie enregistrée.

L’analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des précipitations annuelles.

Les figures 16A et 16B présentent les résultats de l’application des tests de Buishand et de Pettitt sur des séries précipitations annuelles.

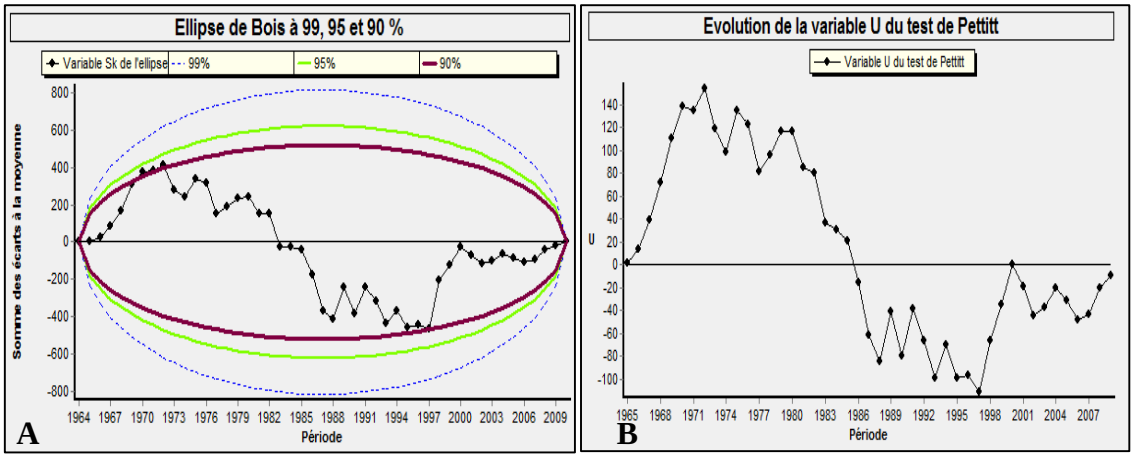


Figure 16 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des précipitations annuelles

Le test de Buishand (figure 16A), le test de Pettitt (figure 16B), la procédure de segmentation de Hubert ne mettent en évidence aucune rupture dans la chronique des précipitations annuelles. Seul le test de Lee et Heghinian met en évidence une rupture située en 1970 dans la chronique des précipitations annuelles. Les moyennes des sous-séries avant et après la rupture sont respectivement de 1009,45 mm et de 1018,75 mm, soit un déficit pluviométrique de 6,76 % après la rupture.

3.2 Tendance thermométrique dans le bassin versant de la Sota

Les figures 17 et 18 présentent l'évolution des températures minimale et maximale annuelles observées dans le bassin versant de la Sota (stations de Kandi et de Parakou).

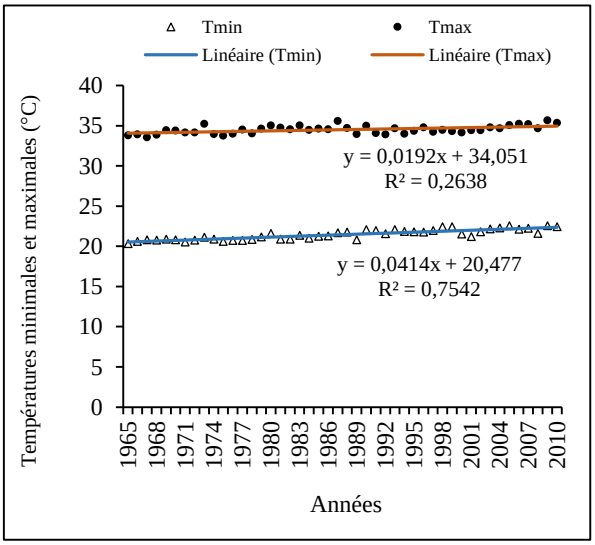


Figure 17 : Tendance des températures maximales et minimales à Kandi

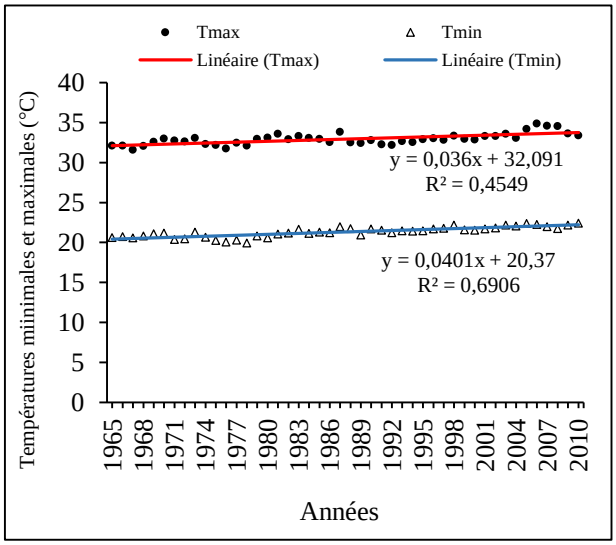


Figure 18 : Tendance des températures maximales et minimales à Parakou

Source : ASECNA, 2010

L'examen des figures 17 et 18 montrent que les températures dans le bassin versant de la Sota ont, dans l'ensemble, une tendance à la hausse. Les températures maximales annuelles varient de 33,57 à 35,65°C à Kandi et de 31,59 à 34,88°C à Parakou; soit une hausse respective de 2,09 °C et 3,29°C entre 1965 et 2010. Quant aux températures minimales, elles sont passées de 20,32 à 22,56 °C à Kandi et de 19,93 à 22,4°C à Parakou ; soit une augmentation respective de 2,23°C et de 2,47°C. Ce réchauffement thermique est davantage illustré par l'augmentation des anomalies thermométriques positives depuis le début des années 1980 (figure 19 et 20).

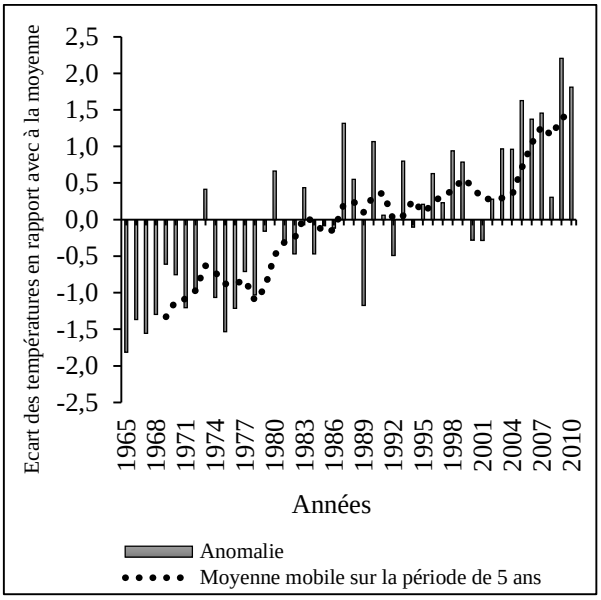


Figure 19 : Anomalies thermométriques de 1965 à 2010 à Kandi

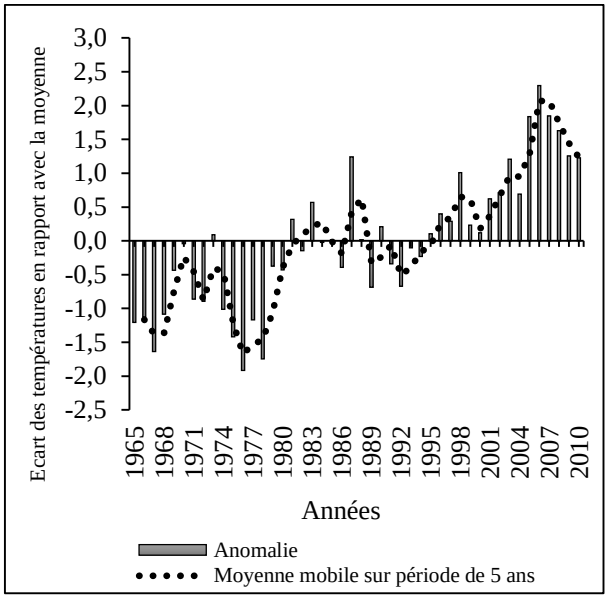


Figure 20 : Anomalies thermométriques de 1965 à 2010 à Parakou

Source : ASECNA, 2010

Le réchauffement s'est accentué car ces dix dernières années, les valeurs de l'anomalie thermométrique sont restées constamment positives (figures 19 et 20). Les figures 21 et 22 présentent les régimes thermométriques moyens de 1965 à 2010 au niveau des stations de Kandi et de Parakou.

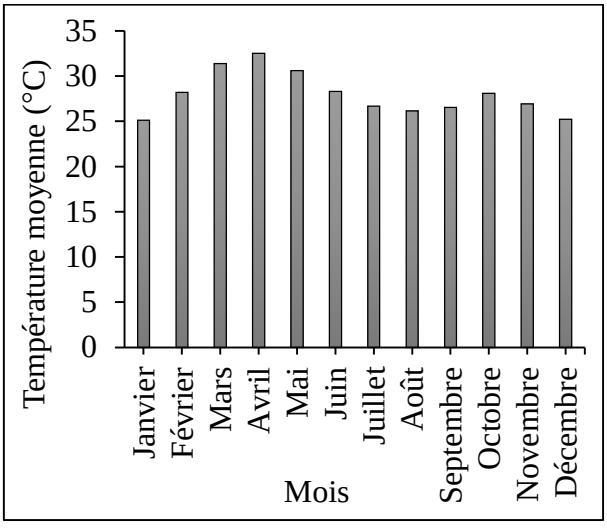


Figure 21 : Régimes thermométriques moyens de 1965 à 2010 à Kandi

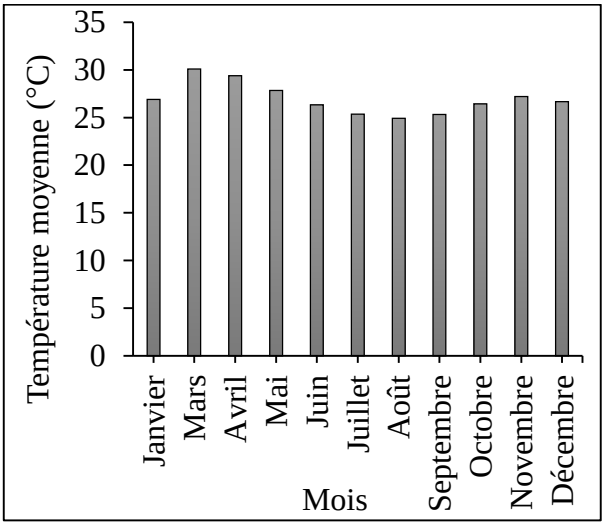


Figure 22 : Régimes thermométriques moyens de 1965 à 2010 à Parakou

Source : ASECNA, 2010

L'observation des figures 21 et 22 montre que les températures moyennes mensuelles présentent toutes une allure bimodale avec les pics aux mois d'avril (32,5°C) et d'octobre (28,1°C) pour la station de Kandi et les mois de mars (30,09°C) et novembre 27,21°C) pour la station de Parakou.

3.3 Variabilité des écoulements dans le bassin versant

3.3.1 Variabilité et tendance interannuelle de l'écoulement

Sur la période 1965-2010, les variations interannuelles des débits sont assez importantes dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri. La moyenne de la série est de 308,20 m^3/s avec un écart-type de 152,28 m^3/s et un coefficient de variation de 49,40 %. On distingue globalement deux phases à débits élevés intercalées par une longue phase à faibles débits (figure 23).

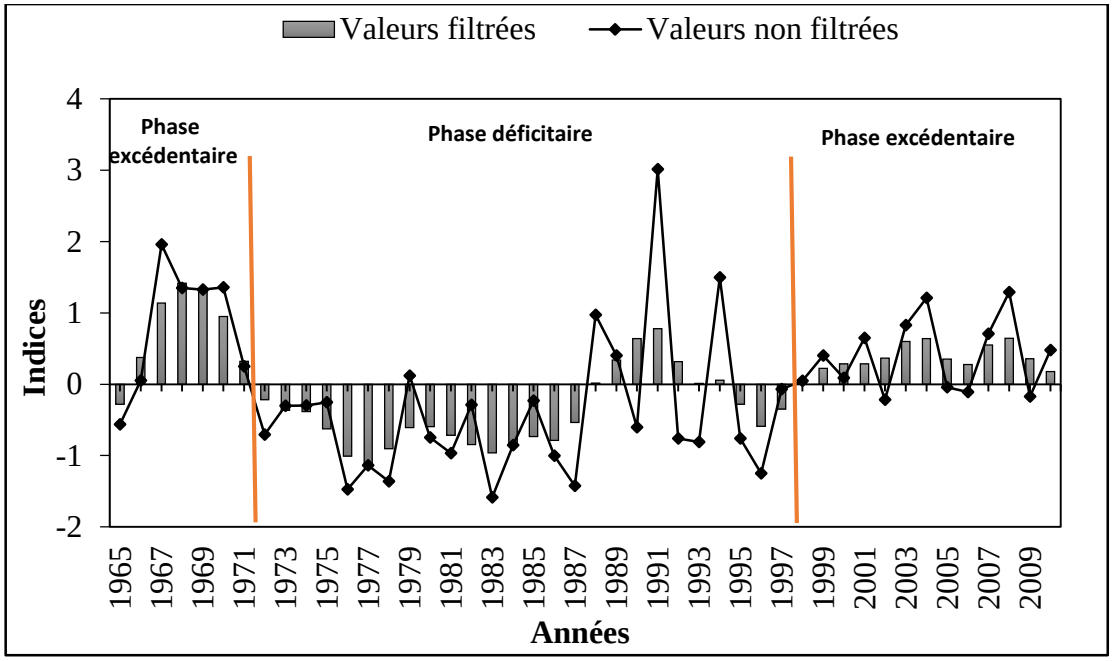


Figure 23 :Variabilité interannuelle des débits de la Sota à l'exutoire de Coubéri (1965-2010)

Source : ASECNA, 2010

La phase de 1965-1971 est caractérisée par des écoulements abondants. La moyenne des débits est de 432,92 m^3/s. Les années 1967 et 1970 ont enregistré des modules très élevés de débits (606,7 m^3/s et 514,79 m^3/s respectivement).

La phase de 1972-1997 est marquée par une baisse des écoulements. La moyenne des débits pour cette phase est de 244,55 m^3/s. les années 1976, 1983 et 1987 ont été

caractérisées par des écoulements particulièrement indigents (avec des débits respectivement de 83,58 m^3/s ; 66,72 m^3/s et 91,53 m^3/s). Notons toutefois qu'au cours de cette longue phase de sécheresse, les quatre années 1988, 1989, 1991 et 1994 ont enregistré des débits supérieurs à la moyenne.

La phase de 1998 à 2010 est caractérisée par des écoulements excédentaires. La moyenne des débits est de 368,69 m^3/s.

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met pas en évidence aucune tendance dans la chronique des débits annuels.

Le test de Buishand (figure 24A), le test de Pettitt (figure 24B), la procédure de segmentation de Hubert ne mettent en évidence aucune rupture dans la chronique des débits annuels.

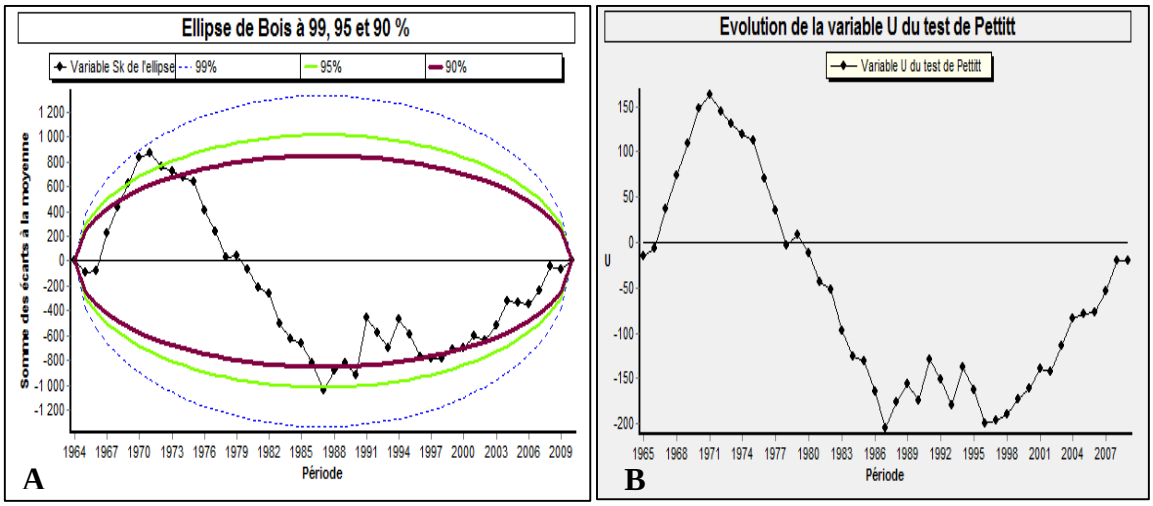


Figure 24 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des débits annuels

Seul le test de Lee et de Heghinian met en évidence une rupture située en 1970 dans la chronique des débits annuels. Les moyennes des sous-séries avant et après la rupture sont respectivement de 433,85 m^3/s et de 287,45 m^3/s, soit un déficit hydrométrique de 33,75 % après la rupture.

3.3.2 Evolution mensuelle de l'écoulement entre les sous-périodes

La figure 25 présente l'évolution mensuelle de l'écoulement entre les sous-périodes 1965-1987 et 1988-2010.

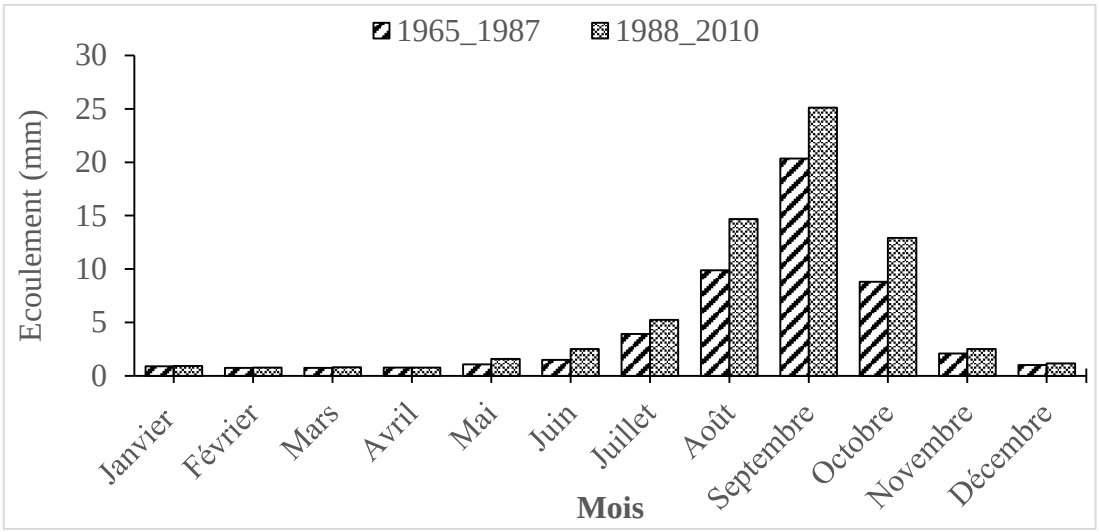


Figure 25 : Evolution mensuelle de l'écoulement sur les sous périodes 1965-1987 et 1988-2010 à Coubéri

Source : ASECNA, 2010

L'observation de la figure 25 montre que les mois d'août, septembre et octobre enregistrent les plus grandes quantités d'écoulement par rapport aux autres mois. Cette grande quantité d'écoulement remarquée est due aux grandes quantités de pluie qui tombent durant ces mois à Coubéri. On note également une hausse généralisée de l'écoulement entre les sous périodes 1960-1987 et 1988-2010.

3.3.3 Evolution des termes du bilan hydrologique

La figure 26 présente l'évolution des termes du bilan hydrologique.

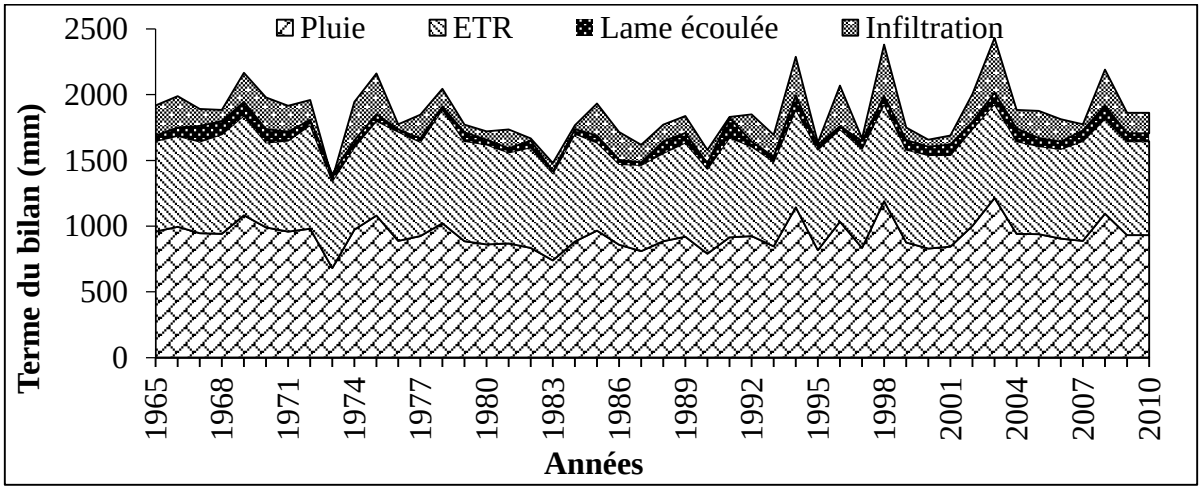


Figure 26 : Bilan hydrologique du bassin versant de la Sota à Coubéri de 1965 à 2010

Source : ASECNA, 2010

L'observation de la figure 26 montre que l'évapotranspiration réelle, la lame d'eau écoulée et l'infiltration dépendent de la quantité de pluie tombée. Ainsi, dans le bassin versant de l'Ouémé à Coubéri, pour des quantités de pluie respectivement de 1215,6 mm, de 1190,86 mm et de 1144,17 mm, on observe une évaporation respective de 715,22 mm, de 738,92 mm et de 745,63 mm. Pour ces mêmes quantités de pluie, respectivement 415,08 mm, 389,85 mm et 293,37 mm s'infiltre et très peu sont les quantités qui s'écoulent, soit respectivement 85,28 mm, 62,08 mm, 105,15 mm au cours des années de fortes quantités de pluie tombée en 2003, 1998 et 1994. Pour ces années, pour 100 % de pluie tombée, plus de 50 % s'évapore, environ 20 à 35 % s'infiltre et 5 à 10 % seulement coule. Les populations enquêtées perçoivent cette variabilité hydroclimatique dans le bassin de la Sota.

3.4 Scénarios climatiques dans le bassin versant de la Sota

3.4.1 Pluviométries mensuelle et annuelle futures

La figure 27 présente les hauteurs moyennes annuelles de pluie dans le bassin versant de la Sota pour la période observée ou référence 1981-2010 et à l'horizon 2050 pour les scénarios A1B et B1.

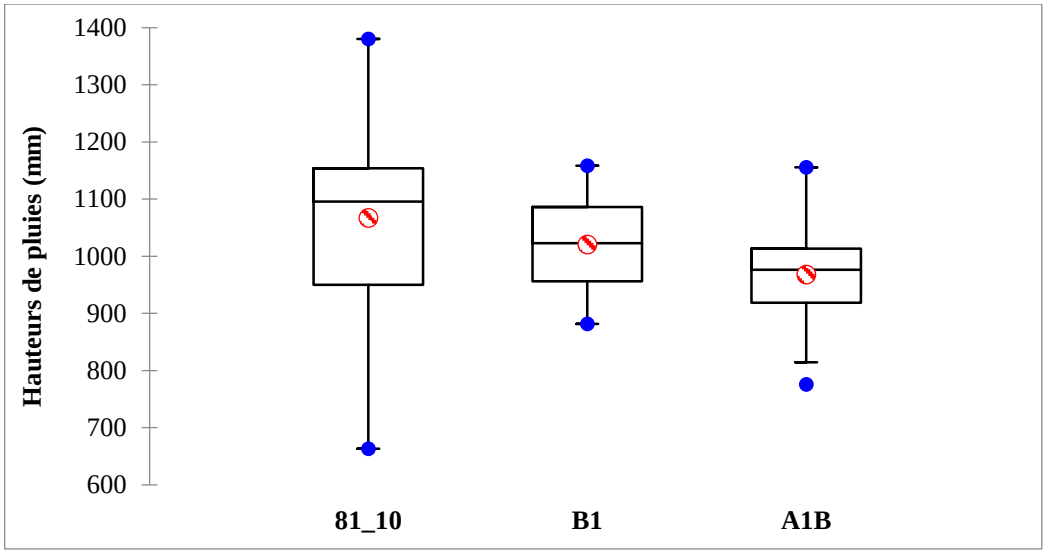


Figure 27 : Hauteurs de pluie moyenne dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050

Source : ASECNA, 2010

Le premier quartile (Q1), la médiane (Q2) et le troisième quartile (Q3) sont respectivement représentés par les barres horizontales inférieures, centrales et supérieures. Les points inférieur, central et supérieur de chaque boite représentent respectivement les valeurs minimum, moyenne et maximale de chaque scénario. De l'observation de la figure 22, il ressort que, dans le bassin versant de la Sota la situation actuelle pourrait changer. La pluviométrie moyenne annuelle baissera légèrement à l'horizon 2050. En effet, les valeurs du premier quartile (Q1) sont respectivement 950,17 mm (1981-2010), 956,25 mm (B1), 918,50 mm (A1B) avec des amplitudes respectives de 717,06 mm, 276,33 mm et 379,33 mm. La valeur médiane confirme cette décroissance pluviométrique supra évoquée. La situation de la pluviométrie moyenne mensuelle est présentée par les figures 28 et 29.

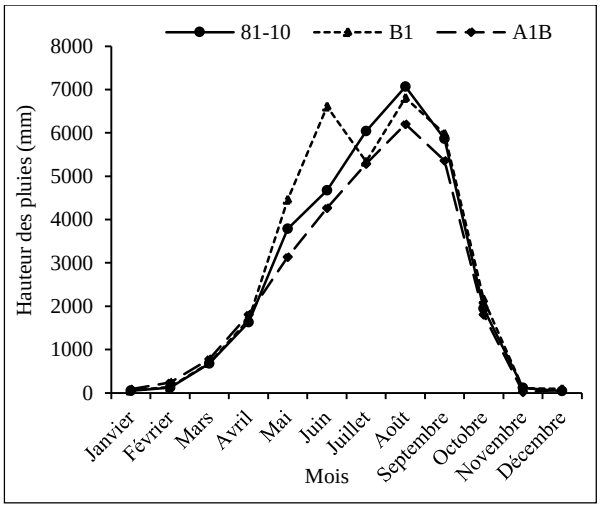


Figure 28 : Moyenne mensuelle des hauteurs de pluie à l'horizon 2050

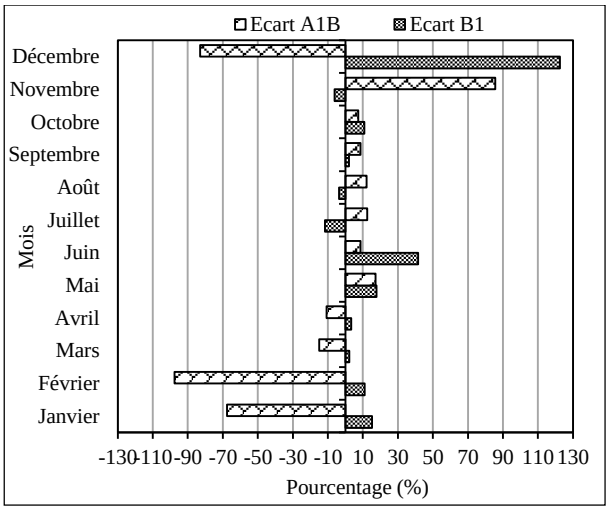


Figure 29 : Ecart de hauteur de pluie (%) dans le bassin versant de Sota à l'horizon 2050

Source : ASECNA, 2010

En ce qui concerne la pluviométrie moyenne mensuelle à l'horizon 2050, les mois de juin et de décembre enregistreront une augmentation pluviométrique respectivement de 41,53 % et 122,58 % selon le scénario B1. Selon le scénario A1B, les mois de janvier, février et de décembre vont connaître une augmentation des hauteurs de pluies respectivement de 67,61 % ; 97,52 % ; 82,91 % contrairement au mois de novembre qui enregistrera une diminution des hauteurs de pluies d'environ 85,66 %. Pour, le scénario B1 la situation se résume ainsi : une diminution pluviométrique en mai (17,93 %) et en

juillet (11,57 %) et une augmentation pluviométrique notable en décembre et juin par rapport à la référence 1981-2010. Au total, les écarts varieront de 17,19 % à 85,66 % pour le scénario A1B et de 41,53 % à 122,58 % pour le scénario B1.

3.4.2 Températures mensuelles et annuelles futures

La figure 30 présente la température moyenne annuelle dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050 (stations de Kandi et de Parakou).

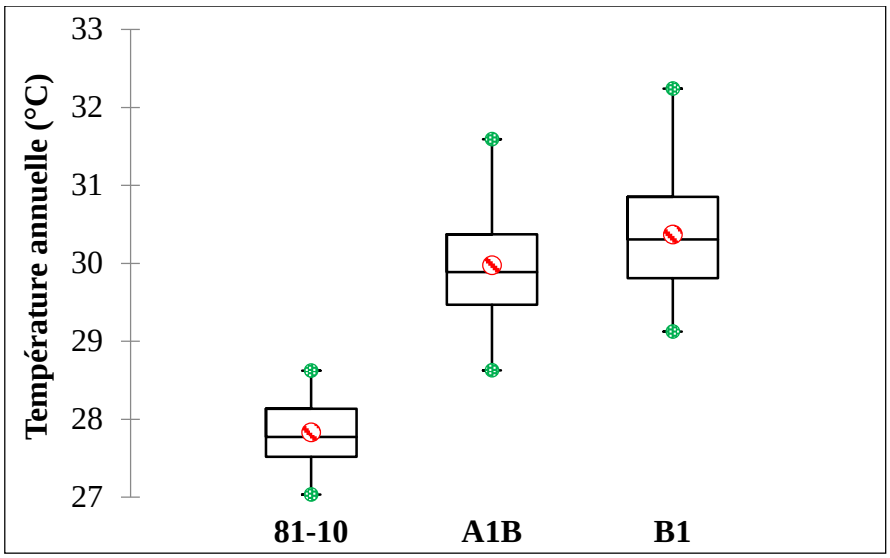


Figure 30 : Température moyenne annuelle dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050

Source : ASECNA, 2010

Le premier quartile (Q1), la médiane (Q2) et le troisième quartile (Q3) sont respectivement représentés par les barres horizontales inférieure, centrale et supérieure. Les points centraux représentent la moyenne des séries observée (1981 à 2010) et projetées à l'horizon 2050 pour les deux scénarios A1B et B1. L'analyse de la figure 30 montre que dans le bassin versant de la Sota, les températures connaîtront une nette augmentation quel que soit le scénario. En effet, les valeurs de la médiane (Q2) sont respectivement de 27,77°C (1981-2010), 29,88°C (A1B), 30,3°C (B1).

La situation de la température moyenne mensuelle est présentée par les figures 31 et 32 du bassin versant de la Sota.

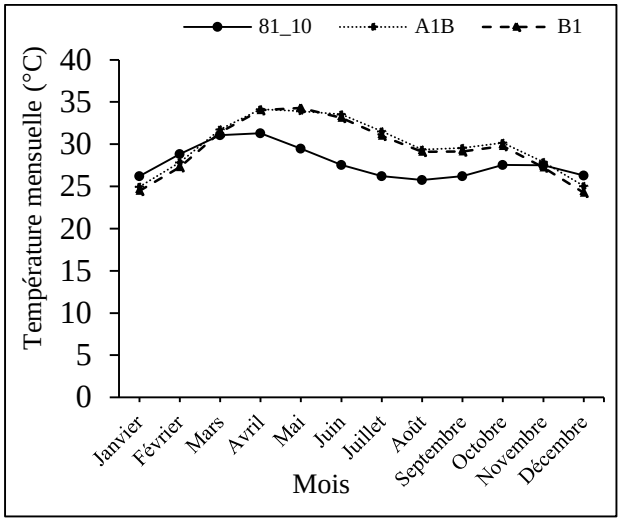


Figure 31 : Moyenne mensuelle des températures dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050

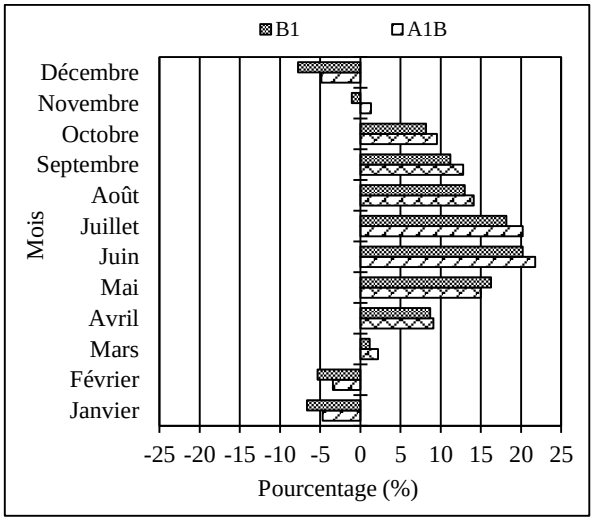


Figure 32 : Ecart des températures dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050

Source : ASECNA, 2010

L'examen des figures 31 et 32 montre que les mois de mars à octobre connaîtront une hausse des températures selon les scénarios A1B et B1. En effet, selon le scénario A1B, les mois de mai, juin, juillet et août connaîtront une augmentation respective de 14,97 %, 21,77%, 20,22 % et 14,1 %. Selon le scénario B1, l'augmentation sera respectivement de 16,24 %, 20,2 %, 18,18 % et 12,98 %. A contrario, les mois de décembre, janvier et février connaîtront une diminution de la température moyenne respectivement de -4,84 %, -4,69 % et -3,41 % selon le scénario A1B et de -7,76 %, -6,64 %, -5,32 % selon scénario.

3.5 Perception de la variabilité hydroclimatique par les populations

3.5.1 Perception sur l'évolution des éléments du climat

3.5.1.1 Perceptions sur l'évolution des pluies

La figure 33 présente les perceptions locales sur l'évolution des pluies.

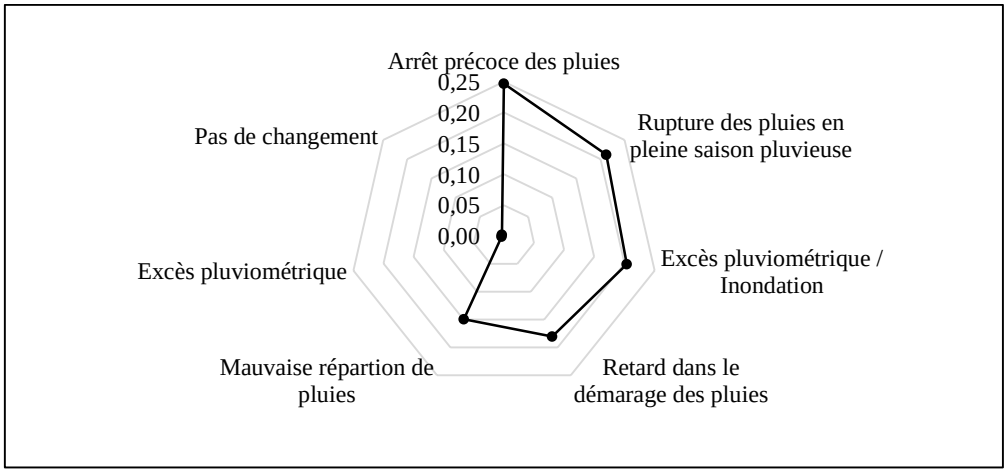


Figure 33 : Perception sur l'évolution des pluies

Source : Résultat de Traitement des données

De l'observation de la figure 33, il ressort qu'il existe plusieurs facteurs d'appréciation des pluies. Parmi ces facteurs, l'arrêt précoce des pluies vient en tête avec 25 % des répondants suivi des ruptures des pluies en pleine saison pluvieuse à 21 % et d'excès pluviométrique/inondation à 20 %.

3.5.1.2 Perceptions sur l'évolution thermométrique

La figure 34 présente les perceptions locales sur l'évolution thermométrique.

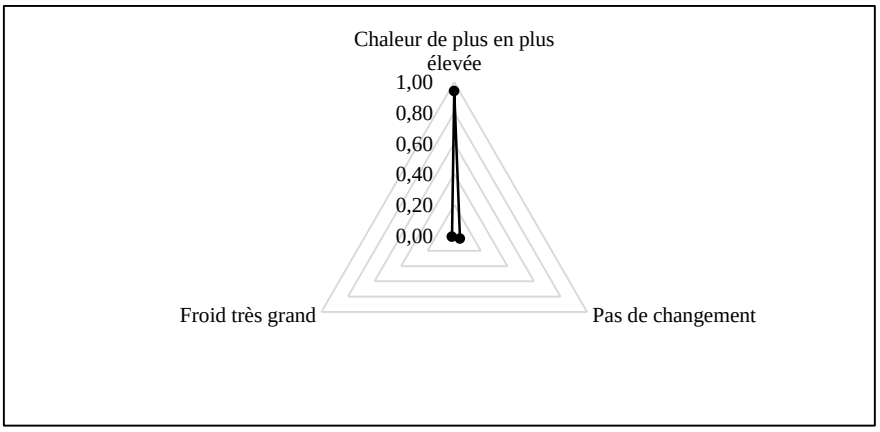


Figure 34 : Perception sur l'évolution thermométrique

Source : Résultat de Traitement des données

L'examen de la figure 34 montre que 94 % des acteurs enquêtés reconnaissent que la chaleur de plus en plus élevée est l'élément d'appréciation des tendances thermométriques. Elle est suivie de froid très grand et d'absence de changement avec respectivement 2 % et 4 % des répondants.

3.5.1.3 Perceptions sur l'évolution du vent

La figure 35 présente les perceptions locales sur l'évolution du vent.

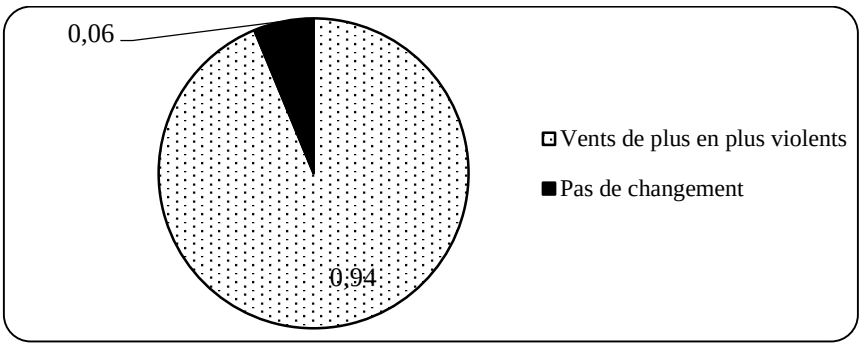


Figure 35: Perception sur l'évolution du vent

Source : Résultat de Traitement des données

De l'analyse de la figure 35, il est à noter que les vents de plus en plus violents sont reconnus par 94 % des transhumants comme étant l'élément d'appréciation des tendances du niveau de vent.

3.5.2 Perceptions sur les causes des changements climatiques

La figure 36 présente les perceptions locales sur les causes des changements climatiques.

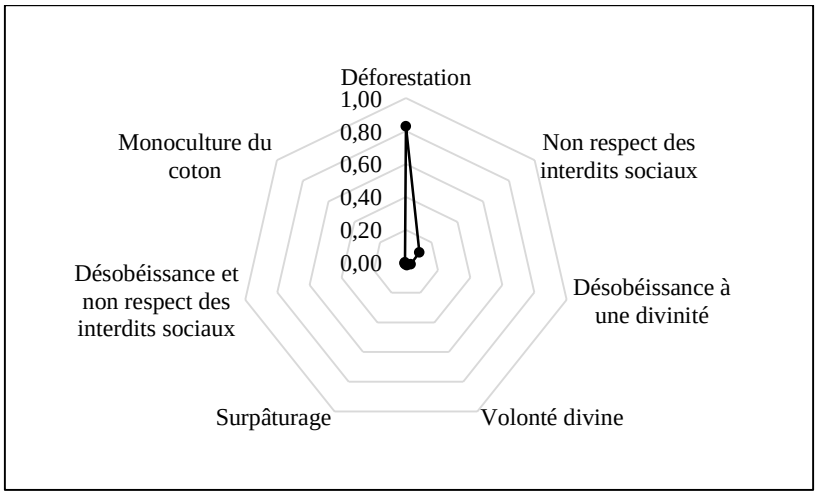


Figure 36 : Perception sur les causes des changements climatiques

Source : Résultat de Traitement des données

De l'observation de la figure 36, il ressort que la déforestation est la principale cause de changement climatique selon 83 % des transhumants. Le non-respect des interdits sociaux (10 %) et la désobéissance à une divinité (3 %) sont aussi reconnu par les transhumants comme étant des causes de changement climatique.

3.6 Discussion

Les résultats montrent l'occurrence de fortes fluctuations interannuelles des précipitations dans le bassin versant de la Sota à Coubéri. Ce bassin versant a connu entre les années 1972 et 1996 une phase de sécheresse qui peut être interprétée comme une manifestation de la grande sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'Ouest à partir de la fin des années 1960 (Bricquet *et al.,* 1997 ; Servat *et al.,* 1999). Ce déficit pluviométrique a été également mis en évidence, au Nord-Togo (Badjana, 2014) et en Côte d'Ivoire (Kouassi, 2010). Des quatre tests statistiques, seul le test de Lee et Heghinian met en évidence dans la série des précipitations annuelles une rupture de stationnarité située en 1970. Cette différence des résultats des tests statistiques est conforme au constat de (Perreault, 2000) qui ont montré à partir de l'étude de séries simulées que ces tests peuvent identifier une rupture en moyenne avec quelques années de différence ou parfois aboutir à des conclusions contradictoires sur une même série de données. L'année de rupture (1970) notée dans la série des précipitations annuelles appartient à la période (1968-1970) identifiée par (Servat, 1998) comme celle des ruptures pluviométriques au Bénin. En comparant les résultats de la présente étude à ceux de (Vissin, 2003) qui ont aussi pris en compte le même bassin versant, on note quelques différences : le test de Pettitt n'a pas identifié, contrairement à l'étude de (Vissin *et al.,* 2003) , de rupture de moyenne dans la série des précipitations annuelles ; en ne tenant pas compte du test statistique, la date de la rupture sur la série des précipitations annuelles est de 1972 dans l'étude de (Vissin *et al.,* 2003) et de 1970 dans la présente étude ; le déficit pluviométrique enregistré après la rupture est respectivement de l'ordre de 12 % dans l'étude de (Vissin *et al.*,2003) et de 6,76 % dans la présente étude. Ces différences pourraient s'expliquer dans les résultats des deux études d'une part par l'inégalité de la longueur des séries étudiées et d'autre part par les stations choisies pour interpoler la pluviométrie du bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Les tendances mises en évidence par l'application du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 et les tests statistiques dans les séries hydrométrique et pluviométrique sont très comparables. Ainsi par exemple, dans la série hydrométrique la rupture identifiée est aussi intervenue en 1970. Le déficit d'écoulement qui en a résulté est de 33,75 %. Ce déficit d'écoulement est inférieur à celui obtenu par (Vissin

et al., 2003), qui ont noté pour le même bassin un déficit d'écoulement de 40 %. Cette baisse relative du déficit d'écoulement pourrait être liée à l'amélioration de la pluviométrie dans le bassin ces dernières années dans la région (Vodounnon, 2010). Le déficit d'écoulement de 33,75 % enregistré fait environ cinq fois celui des précipitations (6,76 %). Ce résultat est similaire à ceux obtenus par d'autres auteurs. Ainsi par exemple Olivry (2002) note que les débits du fleuve Niger à Koulikoro (Mali), à sa sortie de la zone soudanienne, diminuent de 60 % après 1970 du fait d'une diminution de 30 % de la pluviométrie. De même, Mahé *et al.* (2000) et Mahé (2009) soulignent une baisse de plus de 80 % des débits du Bani à Douna au Mali depuis les années 1950, conséquences de la diminution persistante des pluies depuis 1970.

CHAPITRE 4 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA

Ce chapitre traite des états d'occupation des terres de 1995, 2006 et 2013.

4.1 Dynamique des changements spatio-temporels de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota (BVS) de 1995 à 2013

Les changements spatio-temporels des unités d'occupation des terres dans le BVS ont été évalués à travers les cartes d'occupation des terres de 1995, 2006 et 2013.

4.1.1 Etat de l'occupation des terres en 1995

L'analyse des unités d'occupation des terres dans le BVS est faite à travers la carte d'occupation de la figure 37.

L'examen de cette carte indique 9 classes d'occupation des terres. Les forêts claires et savanes boisées bien répandues sont dans les aires protégées du BVS. Les fragments de forêts denses sèches sont disséminés dans les principales aires protégées. Quant aux galeries forestières, elles s'observent le long des affluents de la rivière Sota, mais en bandes très minces. Les savanes arborées et arbustives s'observent un peu partout jusqu'à l'intérieur des terroirs villageois du BVS où les mosaïques de champs et jachères constituent les plus abondantes unités d'occupation des terres. Un îlot de plantation s'observe dans la forêt classée des Trois Rivières.

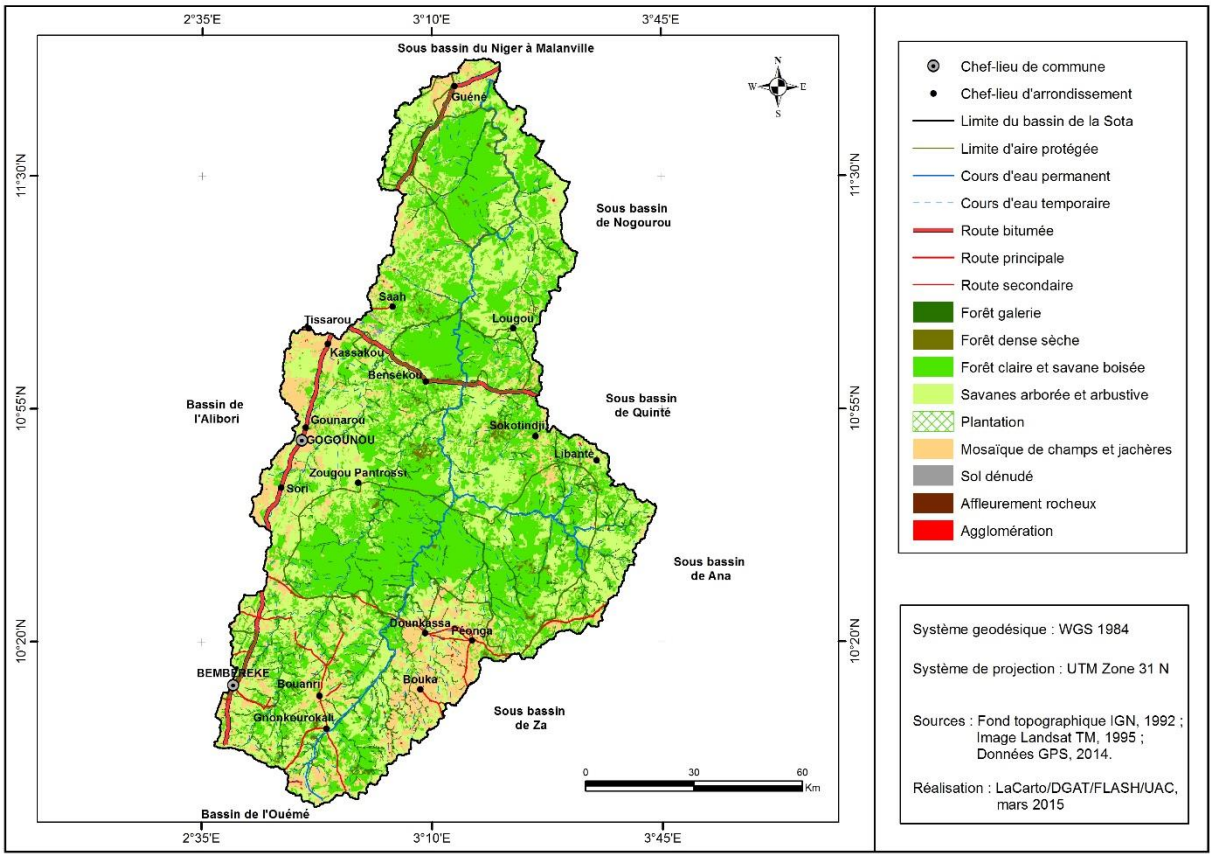


Figure 37 : Occupation des terres de 1995 dans le BVS

4.1.2 Etat de l'occupation des terres en 2006

La figure 38 présente la carte d'occupation des terres de 2006 dans le BVS ; L'examen de cette figure permet d'observer les forêts claires et savanes boisées principalement dans les aires protégées du BVS, les îlots de forêts denses sèches sont remarquables au cœur des principales aires protégées, dans les secteurs moins anthropisés et près des galeries forestières ; les galeries forestières s'observent le long des affluents de la rivière Sota ; les savanes arborées et arbustives qui s'observent jusqu'à l'intérieur des terroirs villageois du BVS où les mosaïques de champs et jachères constituent la plus importante unité d'occupation des terres. Les sols dénudés par contre sont principalement localisés dans les terroirs villageois de Kassakou.

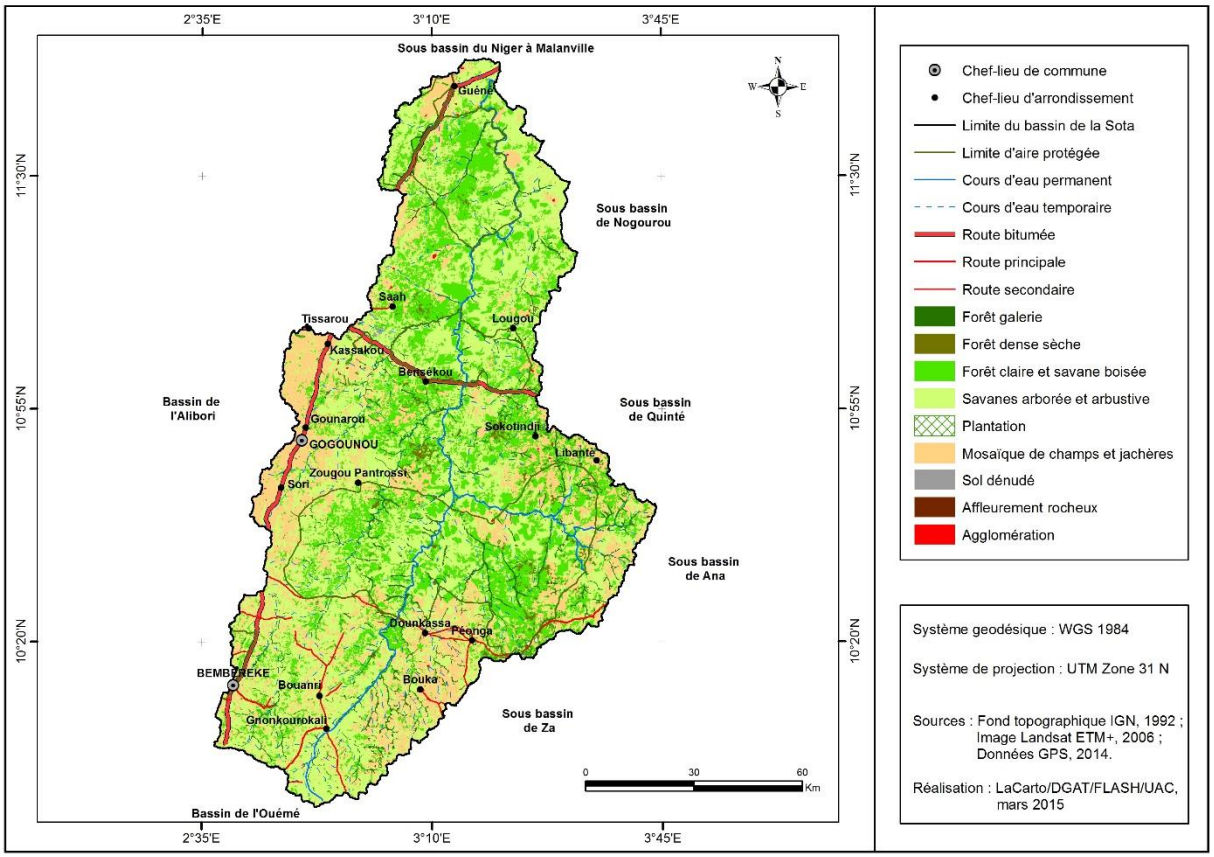


Figure 38 : Occupation des terres de 2006 dans le BVS

4.1.3 Etat de l'occupation des terres en 2013

La figure 39 présente la carte d'occupation des terres de 2006 dans le BVS. L'examen de cette figure montre que les mosaïques de champs et jachères constituent la plus abondante des unités d'occupation des terres et s'observe jusqu'à l'intérieur des aires protégées. Cette unité s'observe. Elle est suivie des savanes arborées et arbustives qui sont devenues les principales formations végétales naturelles du BVS. Les forêts claires et savanes boisées sont réduites en des îlots et concentrées dans les forêts classées de la Sota et des Trois Rivières et dans les terroirs villageois de Libantè, Sokotindji et Bensékou ; on y rencontre les forêts denses sèches qui sont réduites à des fragments. Les galeries forestières s'observent par endroits le long des affluents de la rivière Sota, mais elles sont quasi- inexistantes le long de la Sota. Les sols dénudés par contre, ont connu une grande expansion et se rencontrent désormais dans les terroirs villageois du BVS, mais beaucoup plus aux abords de l'axe Bembèrèkè-Guéné.

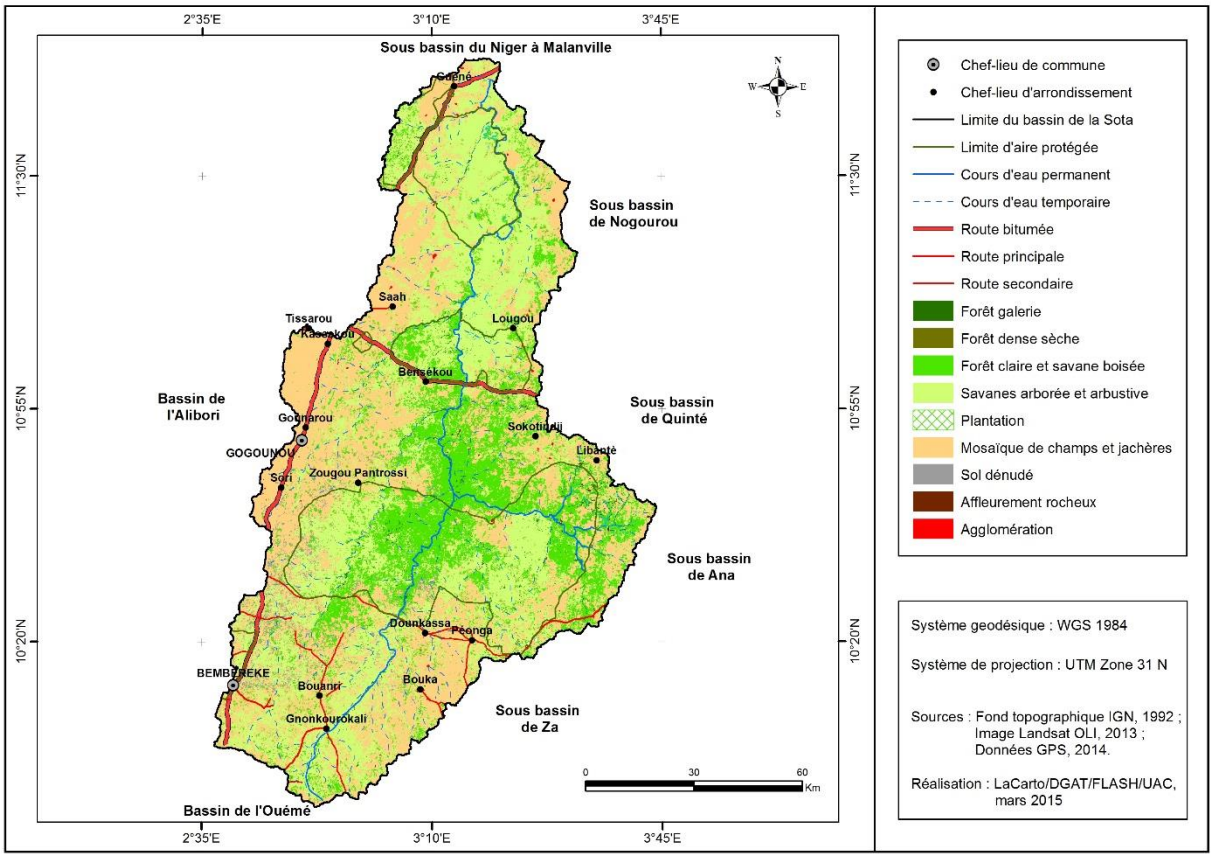


Figure 39 : Occupation des terres de 2013 dans le BVS

4.1.4 Evaluation de la dynamique de l'occupation des terres dans le BVS

4.1.4.1 Dynamique de l'occupation des terres de 1995 à 2006

L'analyse statistique des changements spatio-temporels de l'occupation des terres entre 1995-2006 est présentée dans le tableau VII.

La dynamique des unités d'occupation des terres de 1995 à 2006 est synthétisée par la matrice de transition (Tableau VII). Dans les cellules des lignes et des colonnes se trouvent respectivement les unités d'occupation des terres de 1995 et de 2006. Les conversions se font des lignes vers les colonnes. Les cellules de la diagonale correspondent aux superficies des unités qui sont demeurées stables de 1995 à 2006. Les unités qui sont en dehors de la diagonale représentent les changements des unités d'occupation des terres.

Tableau VII : Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1995 et 2006

Unités de 1995	Unités de 2006									Sup. totale en 1995 (Km²)
	FG	**FDS**	**FCSB**	**SASA**	**PL**	**MCJ**	**AR**	**SD**	**AG**	
FG	507,69	0	0	0	0	194,81	0	0	0	**702,49**
FDS	0	90,21	5,38	13,01	0	36,43	0	0	0	**145,03**
FCSB	0	22,57	3376,33	1652,96	0	512,60	0	0	0	**5564,46**
SASA	0	10,52	110,12	3379,87	1,46	1468,52	0	0	0,80	**4971,28**
PL	0	0	0	1,74	5,31	0,54	0	0	0,19	**7,79**
MCJ	0	0	0	900,15	44,94	824,99	0	2,00	5,16	**1777,2**
AR	0	0	0	0	0	0	9,58	0	0	**9,58**
SD	0	0	0	0	0	0	0	9,39	0	**9,39**
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	29,71	**29,7**
Sup. totale en 2006 (Km²)	**507,69**	**123,30**	**3491,83**	**5947,72**	**51,71**	**3037,88**	**9,58**	**11,39**	**35,87**	**13217**

Sources : *Images Landsat TM de 1995 et Landsat ETM+ de 2006*

Légende :

FG : Forêt galerie ; FDS : Forêt dense sèche ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SASA : Savanes arborée et arbustive ; PL : Plantation ; MCJ : Mosaïque de Champs et jachères ; AR : Affleurement rocheux ; SD : Sol dénudé AG : Agglomération.

Sup. 1995 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation des terres en 1995

Sup. 2006 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation des terres en 2006

507,69 : Superficie demeurée stable entre 1995 et 2006.

L'observation du tableau VII permet d'identifier clairement les différentes conversions qui ont eu lieu entre les unités d'occupation des terres. Il ressort de cette observation que toutes les formations végétales naturelles ont connue des transformations. Ainsi, les galeries forestières ont été converties (194,81 km²) en mosaïques de champs et jachères ; cependant, 507,69 km² sont restées stables. Les forêts denses sèches ont été converties (5,38 km²) en forêts claires et savanes boisées, en savanes arborées et arbustives (13,01 km²) et une grande partie (36,43 km²) en mosaïques de champs et jachères, sauf 90,21 km² resté stable. Les forêts claires et savanes boisées ont été converties 1652,96 km² en savanes arborées et arbustives, en mosaïques de champs et jachères (12,60 km²) et en forêts denses sèches (25,22 km²), alors que 3435,12 km² sont restées inchangées. Les savanes arborées et arbustives ont connu la plus grande conversion avec 1452,97 km² transformés en mosaïques de champs et jachères, 110,12 km² en forêts claires et savanes boisées, 10,52 km² en forêts denses sèches, 1,46 km² en plantations et 0,80 km² en

agglomérations ; la superficie restée inchangée est de 3372,81 km². Une superficie de 900,15 km² des champs et jachères a été convertie en savanes arborées et arbustives, 44,94 km² en plantations, 2 km² en sols dénudés et 5,16 km² en agglomérations. Les autres unités n'ont pas connu de conversion.

Cette matrice a permis de dégager trois changements majeurs :

- la dégradation des formations forestières, marquée par une réduction de 8,76 % des superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses sèches ;
- la savanisation, marquée par l'extension des savanes arborées et arbustives au détriment des forêts denses sèches et des forêts claires sur une proportion de 19,85 % ;
- l'augmentation de 24,69 % des zones de culture et des agglomérations dans le BVS.

4.1.4.2 Dynamique de l'occupation des terres de 2006 à 2013

La dynamique des unités d'occupation des terres de 2006 à 2013 est synthétisée par la matrice de transition du tableau VIII.

Tableau VIII : Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 2006 et 2013

Unités de 2006	Unités de 2013									Sup. totale en 2006 (Km²)
	FG	FDS	FCSB	SASA	PL	MCJ	AR	SD	AG	
FG	190,25	0	0	0	0	317,44	0	0	0	**507,69**
FDS	0	20,61	15,961	23,90	0	62,83	0	0	0	**123,30**
FCSB	0	3,20	2521,73	211,15	0	755,76	0	0	0	**3491,83**
SASA	0	1,272	55,90	3765,83	0	2124,60	0	0	0,12	**5947,72**
PL	0	0	0	0	50,46	0,23	0	0	1,02	**51,71**
MCJ	0	0	0	856,88	7,13	2166,50	0	5,12	2,25	**3037,88**
AR	0	0	0	0	0		9,58	0	0	**9,58**
SD	0	0	0	0	0	0	0	11,39	0	**11,39**
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	35,87	**35,87**
Sup. totale en 2013 (Km²)	**190,25**	**25,08**	**2593,59**	**4857,76**	**57,59**	**5427,35**	**9,58**	**16,5**	**39,26**	**13217**

Sources : *Landsat ETM+ de 2006 et Images Landsat OLI, 2013*

L'examen de la matrice de transition du tableau VIII permet d'identifier clairement les différentes conversions opérées à l'intérieur et dans les classes d'occupation des terres entre 2006 et 2013. Il ressort que toutes les formations végétales naturelles ont régressé.

En effet, les galeries forestières qui occupaient 507,69 km² en 2006 sont passées à 190,25 km² en 2013. 317,44 km² de ces formations ont été converties en mosaïques de champs et jachères. Par contre, seulement 20,61 km² des forêts denses sèches sont restées inchangées, 15,96 km² sont converties en forêts claires savanes boisées, 23,90 km² en savanes arborées et arbustives et 62,83 km² en champs et jachères. Les forêts claires et savanes boisées ont connu 2521,71 km² de stabilité en 2013 sur 3491,72 km² en 2006, une partie s'est convertie (3,30 km²) en forêts denses sèches, 211,15 km² en savanes arborées et arbustives et 755,76 km² en champs et jachères. Au niveau des savanes arborées et arbustives, 1,27 km² ont été convertis en forêts denses sèches ; 55,90 km² en converties en forêts claires savanes boisées ; 2124,60 km² en champs et jachères et environ 0,12 km² en agglomérations. Les plantations qui représentaient 51,71 km² du BVS en 2006 sont passées à 57,59 km² en 2013 ; il est important de noter que 0,23 km² de plantations ont été convertis en champs et jachères et 1,02 km² en agglomérations. Les mosaïques de champs et jachères ont connu aussi des conversions. Ainsi 856,88km² converties en savanes arborées et arbustives ; 7,13 km² en plantations ; 5,12 km² en sols dénudés et environ 2,25 km² en agglomérations. Les autres unités n'ont pas été converties.

Une analyse des différentes conversions opérées dans le BVS permet de retenir trois phénomènes majeurs intervenus entre 2006 et 2013 :

- une forte dégradation des formations végétales naturelles, marquée par une réduction de 44,2 % de l'ensemble des superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses ;
- une savanisation est observée sur 8,27 % du BVS, marquée par la conversion des formations forestières en savanes ;
- une forte anthropisation du milieu naturel sur 16,10 % du BVS, marquée par une augmentation des zones de culture, des sols dénudés et des agglomérations dans le BVS.

Ces données des deux matrices de transition (tableaux VIII et IX) permettent d'évaluer au niveau des unités d'occupation des terres, leur taux moyen annuel d'expansion spatiale et leur vitesse d'évolution (extension ou régression).

4.1.5 Taux moyen annuel d'expansion spatiale et vitesse d'évolution des unités d'occupation des terres dans le BVS

Les variations des taux moyen annuel d'expansion spatiale et leur vitesse d'évolution (extension ou régression) sont consignées dans les tableaux IX et X.

Tableau IX : Taux moyen annuel d'expansion spatiale et vitesse d'évolution des unités d'occupation des terres de 1995 à 2006

Unités d'occupation	Sup.totale 1995 (Km^2)	Sup.totale 2006 (Km^2)	T (%)	Δs (Km^2/an)
FG	707,89	509,96	- 2,98	- 17,99
FDS	147,68	125,95	- 1,45	- 1,98
FCSB	5714,93	3550,62	- 4,33	- 196,76
SASA	4948,68	6032,35	1,80	98,52
PL	8,53	52,52	16,52	4,00
MCJ	1823,0	3071,16	4,74	113,47
AR	9,85	9,85	0,00	0,00
SD	9,62	11,62	1,72	0,18
AG	29,8	35,95	1,71	0,56

T (km^2) : taux moyen annuel d'expansion spatiale; Δs (km^2/an) : vitesse d'évolution

De l'examen du tableau IX, il ressort que les plantations ont connu la plus forte expansion avec en moyenne 16,52 % et une vitesse de progression de l'ordre de 4 km^2/an de 2006 à 2013, suivie des mosaïques de champs et jachères avec une expansion moyenne annuelle de 4,74 % et une vitesse d'extension de 113,47 km^2/an. Quant aux formations végétales naturelles, seules les savanes arborées et arbustives ont connu une extension avec un taux moyen annuel de 1,80 % et une vitesse de 98,52 km^2/an. A l'opposé des progressions, on note au niveau des forêts claires et savanes boisées la plus importante régression (-4,33 %) avec une vitesse d'évolution de -196,76 km^2/an. Les forêts denses sèches ont régressé aussi avec -1,45 % et une vitesse de régression estimée à -1,98 km^2/an, ainsi que les galeries forestières qui ont régressé de -2,98 % avec une vitesse de -17,99 km^2/an. Les sols dénudés et les agglomérations ont connu respectivement des extensions relativement faibles avec des vitesses d'évolution faibles (1,72 % soit 0,18 km^2/an et 1,71 % soit 0,56 km^2/an).

Tableau X : Taux d'expansion moyen annuel et vitesse d'évolution (progression ou régression) des unités d'occupation des terres de 2006 à 2013

Unités d'occupation	Sup. 2006 (Km²)	Sup. 2013 (Km²)	T (%)	Δs (Km²/an)
FG	509,96	190,96	-14,03	-45,57
FDS	125,95	25,48	-22,83	-14,35
FCSB	3550,62	2594,52	-4,48	-136,59
SASA	6032,35	4940,45	-2,85	-155,99
PL	52,75	58,49	1,48	0,82
MCJ	3071,16	5524,45	8,39	350,47
AR	9,85	9,85	0	0,00
SD	11,62	16,26	4,81	0,66
AG	35,95	39,75	1,44	0,54

L'examen du tableau X indique que les mosaïques de champs et jachères ont connu la plus grande extension, avec une expansion moyenne annuelle de 8,39 % et une vitesse d'extension de 350,47 km²/an, suivies des sols dénudés avec 4,81 % de progression et 0,66 km²/an de vitesse d'évolution. Concernant les plantations, elles ont connu une expansion moyenne annuelle de 1,48 % et une vitesse de progression de l'ordre de 0,82 km²/an. Les agglomérations ont connu une expansion moyenne annuelle de 1,44 % et une vitesse d'extension de 0,54 km²/an. Quant aux formations végétales naturelles, elles ont connu toutes une régression. Les savanes arborées et arbustives ont connu la plus rapide régression avec une vitesse de -115,99 km²/an et une diminution de -2,85 %, suivie des forêts claires et savanes boisées avec une vitesse de -136,59 km²/an et une régression de -4,48 %. Par contre, la plus grande régression (-22,83 %) est observée au niveau des forêts denses sèches avec une vitesse de -14,35 km²/an suivies des galeries forestières avec une réduction de -14,03 % et une vitesse de -45,57 km²/an.

4.1.6 Intensités des changements par intervalle de temps, de catégories et transition des unités d'occupation des terres dans le BVS

La figure 40 présente l'intensité des changements entre les différentes catégories d'occupation des terres et à l'intérieur de chacune d'elles entre 1995 et 2006.

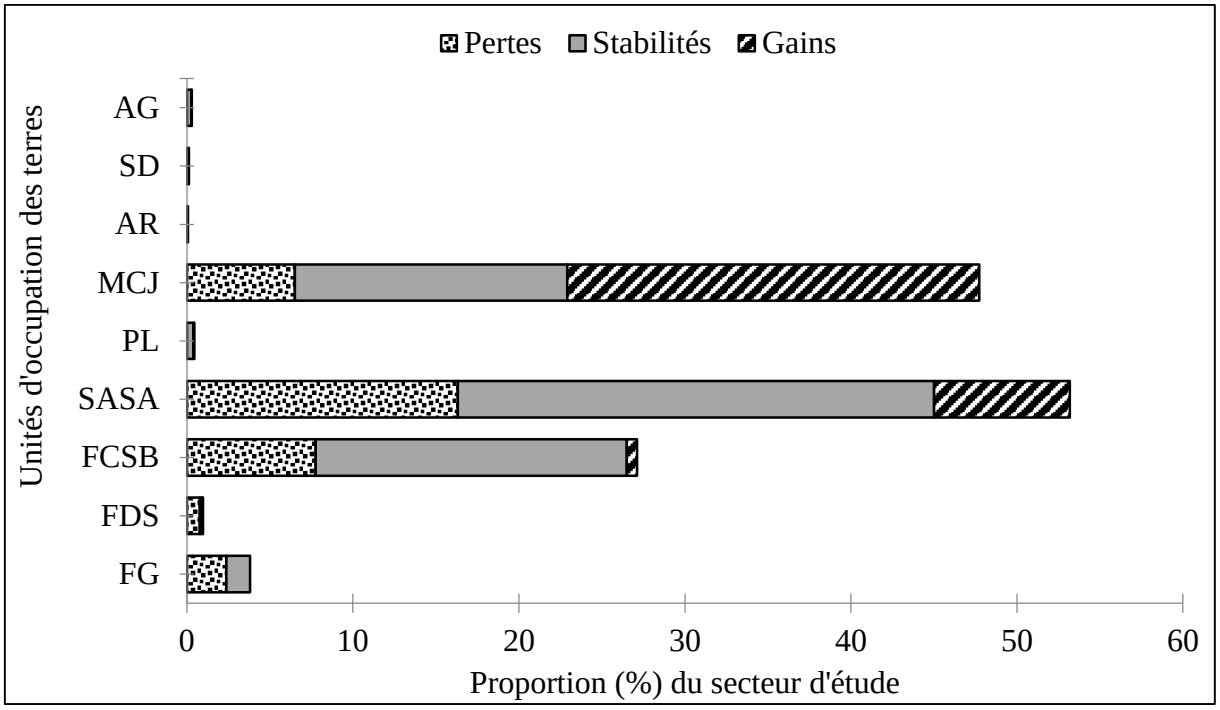


Figure 40 : Intensité des changements opérés globalement entre catégories et à l'intérieur de chaque classe entre 1995 et 2006

Source : Résultat de Traitement des données

L'examen de la figure 40 indique que globalement les changements entre les classes d'occupation des terres se sont opérés de façon inégale sur le plan spatial dans le BVS. Ainsi, les savanes arborées et arbustives sont les classes où les changements ont été plus significatifs sur environ 57 % du secteur d'étude avec, 12 % de perte contre 19 % de gain et 26 % de stabilité. Les forêts claires et savanes boisées ont connu de changement sur 44 % du secteur d'étude avec 17 % de perte contre 1 % de gain et 26 % de résistance (stabilité). Viennent ensuite les champs et jachères sur 30 % du secteur avec 17 % de gain contre 7 % de perte et 6 % de stabilité. Les forêts galeries ont enregistré des changements sur 5 % du secteur dont 1 % de perte et 4 % de stabilité. Enfin, les forêts denses sèches ont connu des changements sur 1,5 % du secteur avec, 0,5 % de perte, 0,5 % de gain et 0,5 % de résistance. Les autres classes d'occupation n'ont connu ni de perte ni de gain mais une relative stabilité.

La figure 41 présente l'intensité des changements entre les différentes catégories d'occupation des terres et à l'intérieur de chacune d'elles entre 2006 et 2013.

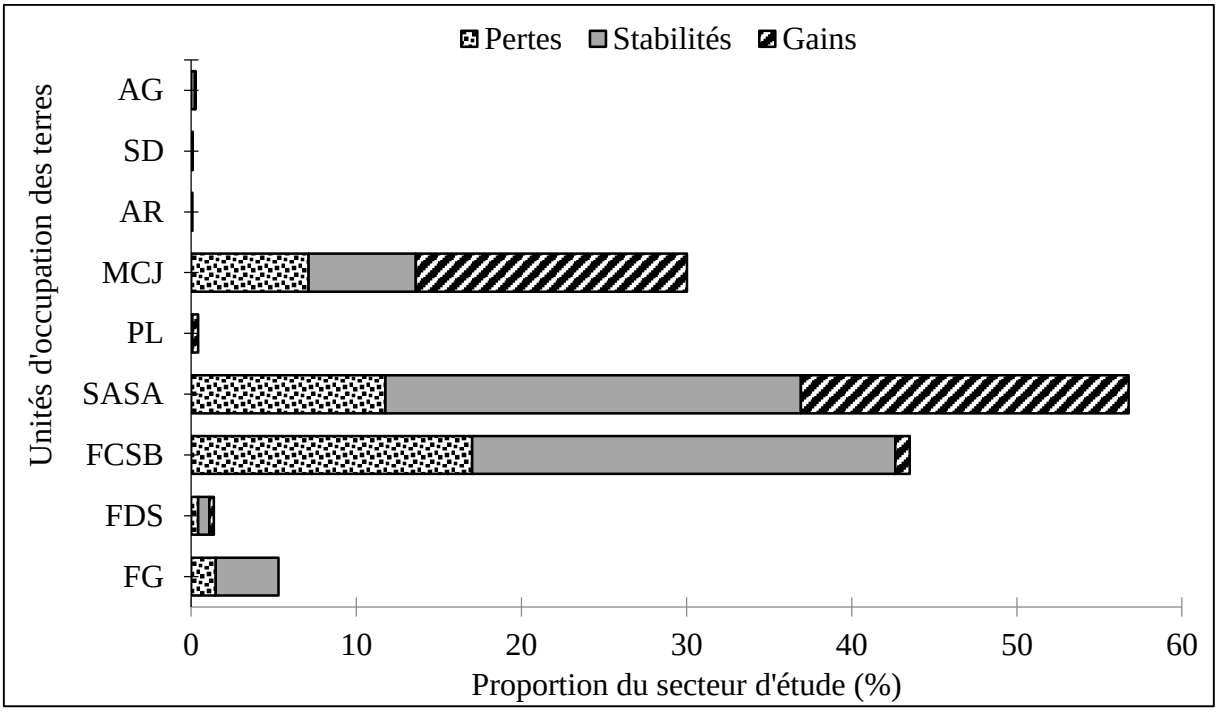


Figure 41 : Intensité des changements opérés globalement entre catégories et à l'intérieur de chaque classe entre 2006 et 2013

Source : Résultat de Traitement des données

L'examen de la figure 41 montre clairement les changements opérés entre les classes d'occupation des terres sur le plan spatial dans le BVS avec dans chaque catégorie, des zones de perte, de stabilité et de gain avec des proportions différentielles. Les savanes arborées et arbustives sont les classes où les changements ont été les plus significatifs sur environ 53 % du secteur d'étude avec, 8 % de perte contre 17 % de gain et 28 % de stabilité. Viennent ensuite Les champs et jachères sur 48 % du secteur avec 25 % de gain contre 7 % de perte et 16 % de stabilité. Les forêts claires et savanes boisées ont enregistrées des changements sur 27 % du secteur d'étude avec, 7 % de perte contre 1 % de gain et 19 % de résistance. Les forêts galeries ont connu des changements sur 3 % du secteur dont 2 % de perte et 1 % de stabilité et les forêts denses sèches ont connu uniquement de perte (1 %). Les autres classes d'occupation n'ont connu ni de pertes ni de gains mais une relative stabilité.

4.1.7 Intensités et vitesses des changements à l'intérieur de chaque catégorie d'occupation des terres

La figure 42 présente les intensités et les vitesses des changements à l'intérieur de chaque catégorie d'occupation des terres entre1995 et 2006.

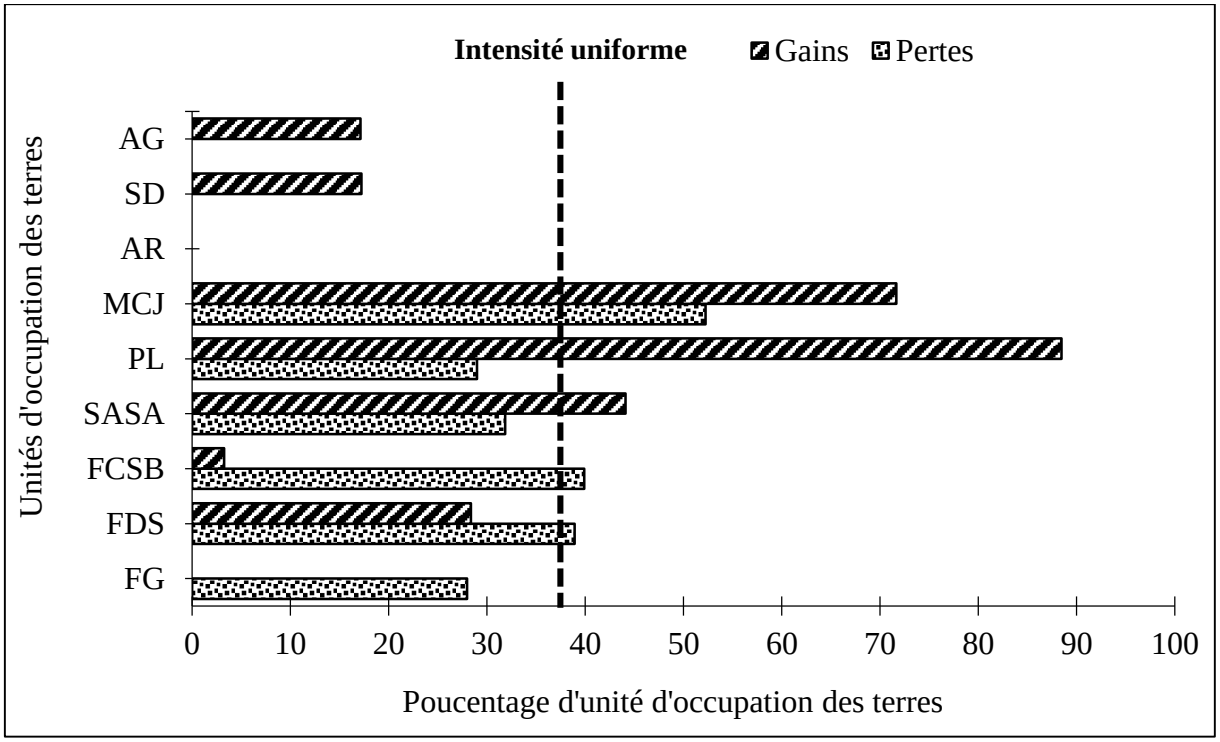


Figure 42 : Intensités et vitesses des changements par catégorie d'occupation des terres dans le secteur d'étude entre entre 1995 et 2006

Source : Résultat de Traitement des données

L'observation de la figure 42 montre que toutes les formations végétales naturelles ont connu des gains et des pertes par rapport à la superficie du secteur d'étude à l'exception des galeries forestières qui ont enregistré uniquement des pertes. Les formations anthropisées (plantations, champs et jachères) ont connu des gains et des pertes. Cependant les agglomérations et les sols dénudés ont enregistrés uniquement des gains. La ligne verticale en tiretés rouges est la zone où les changements restent uniformes si les perturbations s'arrêtent dans le BVS. A gauche de cette ligne, les changements sont dits dormants ou lents. Tandis qu'à sa droite, les changements sont qualifiés d'actifs ou rapides.

Ceci étant, les changements opérés au niveau des différentes catégories d'occupation des terres du secteur d'étude sont actifs ou rapides pour les champs et jachères, les plantations et les savanes arborées et arbustives et dormants ou lents pour les galeries forestières, les forêts denses sèches, les forêts claires et savanes boisées et enfin les sols dénudés et les affleurements rocheux. Dans l'intervalle de 11 ans précisément, ce sont les champs et jachères, les plantations et les savanes arborée et arbustive qui ont eu la plus grande vitesse de changements sur 100 % du secteur d'étude avec, des gains plus importants. Viennent ensuite les forêts claires et savanes boisées (39 % de perte et 3 % de gain), les forêts denses sèches (38 % de pertes et 27 % de gains) et enfin les forêts galeries avec uniquement des pertes de 28 % et les agglomérations avec uniquement 17 % de gain.

La figure 43 présente les intensités et les vitesses des changements à l'intérieur de chaque catégorie d'occupation des terres entre 2006 et 2013.

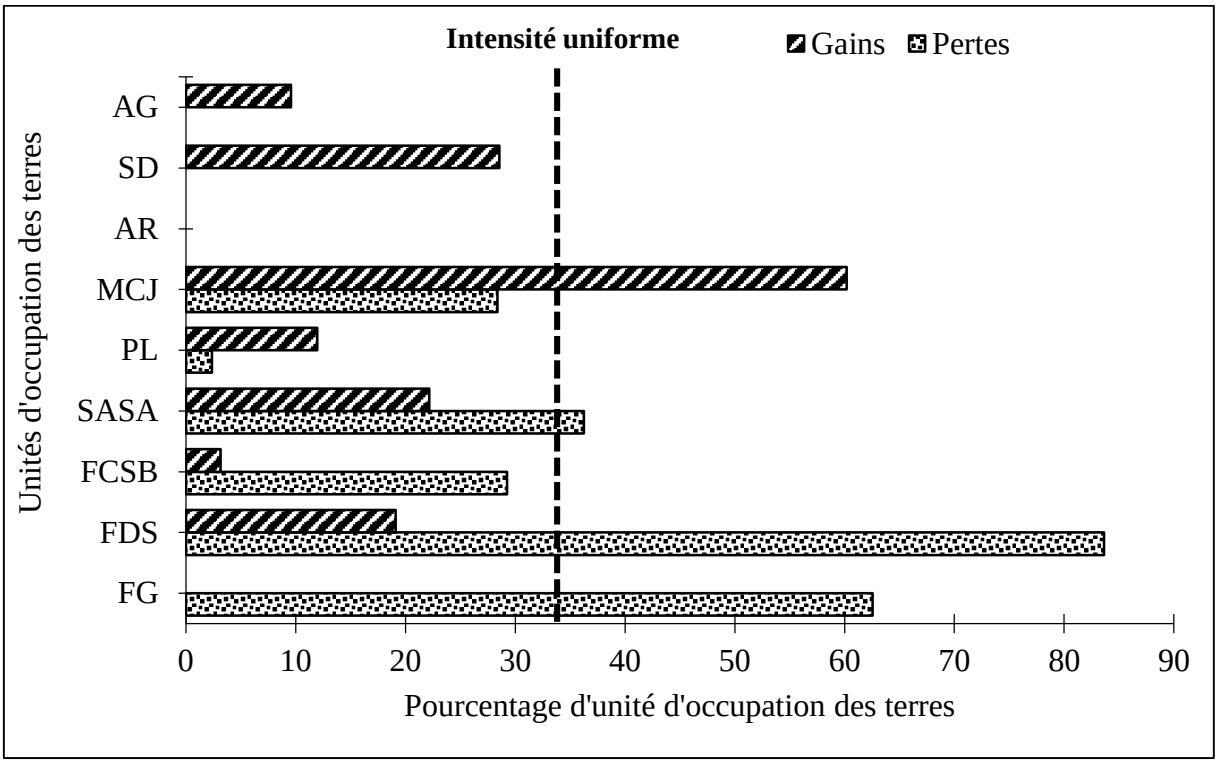


Figure 43 : Intensités et vitesses des changements par catégorie d'occupation des terres dans le secteur d'étude entre entre 2006 et 2013

Source : Résultat de Traitement des données

L'examen de la figure 43 montre que toutes les formations végétales naturelles ont connu des gains et des pertes à l'exception des galeries forestières qui ont enregistré

uniquement des pertes. Les formations anthropisées (champs, jachères et plantations) des pertes et des gains à l'exception des agglomérations et des sols dénudés ont connu seulement des gains.

En effet, les changements opérés au niveau des différentes catégories d'occupation des terres du secteur d'étude sont rapides pour les champs et jachères, les galeries forestières, les forêts denses sèches et dormants pour les savanes arborées et arbustives, les forêts claires et savanes boisées et enfin les sols dénudés, les plantations et les affleurements rocheux. Dans l'intervalle de 7 ans précisément, ce sont les champs et jachères (29 % de perte et 60 % de gain), les forêts denses sèches (83 % de perte et 18 % de gain), les galeries forestières avec uniquement 63 % de perte qui ont eu la plus grande vitesse de changements. Viennent ensuite les savanes arborées et arbustives avec 22 % de gains pour 37 % de perte ; les forêts claires et savanes boisées avec 28 % de pertes et 3 % de gain. La figure 54 présente la synthèse de l'évolution de l'occupation du sol de 1995 à 2013

4.2 Tendances évolutives de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota et projection à l'horizon 2050

4.2.1 Tendances évolutives de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota

La figure 44 présente la synthèse de l'évolution de l'occupation du sol de 1995 à 2013

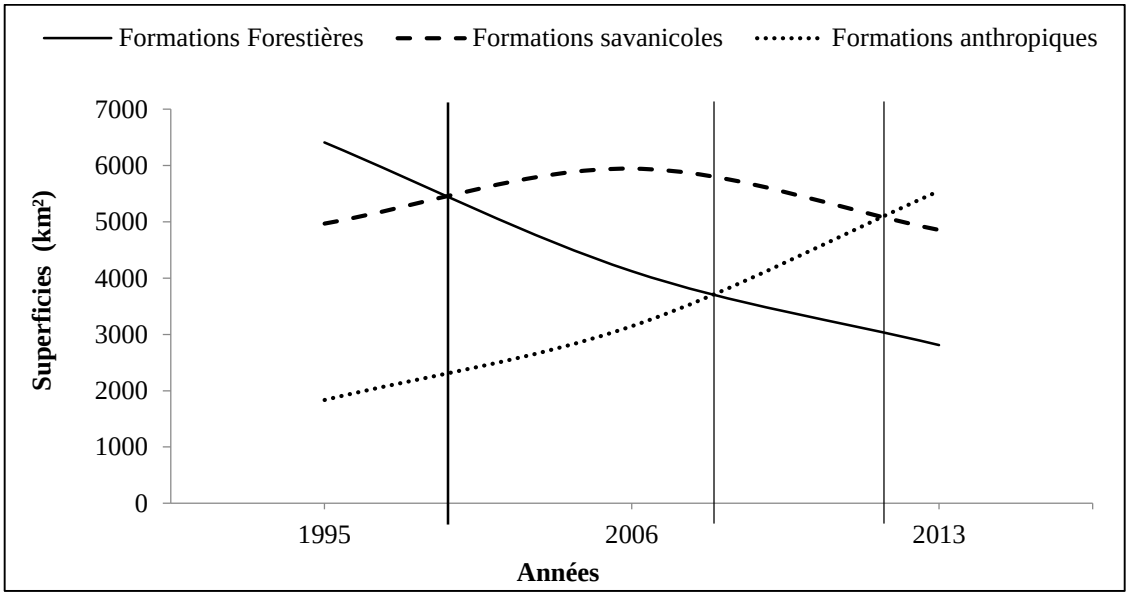


Figure 44 : Synthèse de l'évolution de l'occupation du sol de 1995 à 2013

Source : Résultat de Traitement des données

L’évolution des courbes de cette figure permet de partitionner la période de l’étude en trois séquences principales. La première est celle des années 1990 et avant, marquée par la prépondérance des formations forestières suivies des savanes ; les champs et jachères étant au bas de l’échelle.

La seconde est celle des années 2000, période au terme de laquelle la courbe ascendante des formations anthropiques rencontre celle descendante des formations forestières ; la courbe des savanes passe au-dessus de celle des forêts et occupe le haut de l’échelle.

La troisième séquence qui suit la précédente est celle des années 2010. La courbe des formations anthropiques monte rapidement pour passer au-dessus de celle des savanes qui amorce à son tour une descente.

Durant toute la période de l’étude, les formations forestières ont enregistré une baisse continue à l’opposé des formations anthropiques qui ont enregistré une augmentation continue. A partir de 2008, il y a un infléchissement du rythme d’évolution des forêts tandis que s’accélère celui des formations anthropiques. La courbe des savanes montre d’abord une évolution ascendante jusqu’au milieu des années 2000 avant d’amorcer une allure descendante.

L’augmentation progressive de la superficie des formations savanicoles avant les années 2000 s’expliquerait par une transformation des vieilles jachères issues des défrichements des forêts pour la mise en place des cultures. Les forêts devenant de plus en plus rares, les nouveaux défrichements s’opèrent aux dépens des savanes, d’où l’amorce de la diminution de leur superficie.

4.2.2 Projection de l’occupation des terres dans le bassin de la Sota à l’horizon 2050

Les probabilités de transition déduites à partir des cartes d’occupation du sol de 2006 et de 2013 ont permis d’obtenir l’état probable de l’occupation des terres à l’horizon 2050 (figure 45).

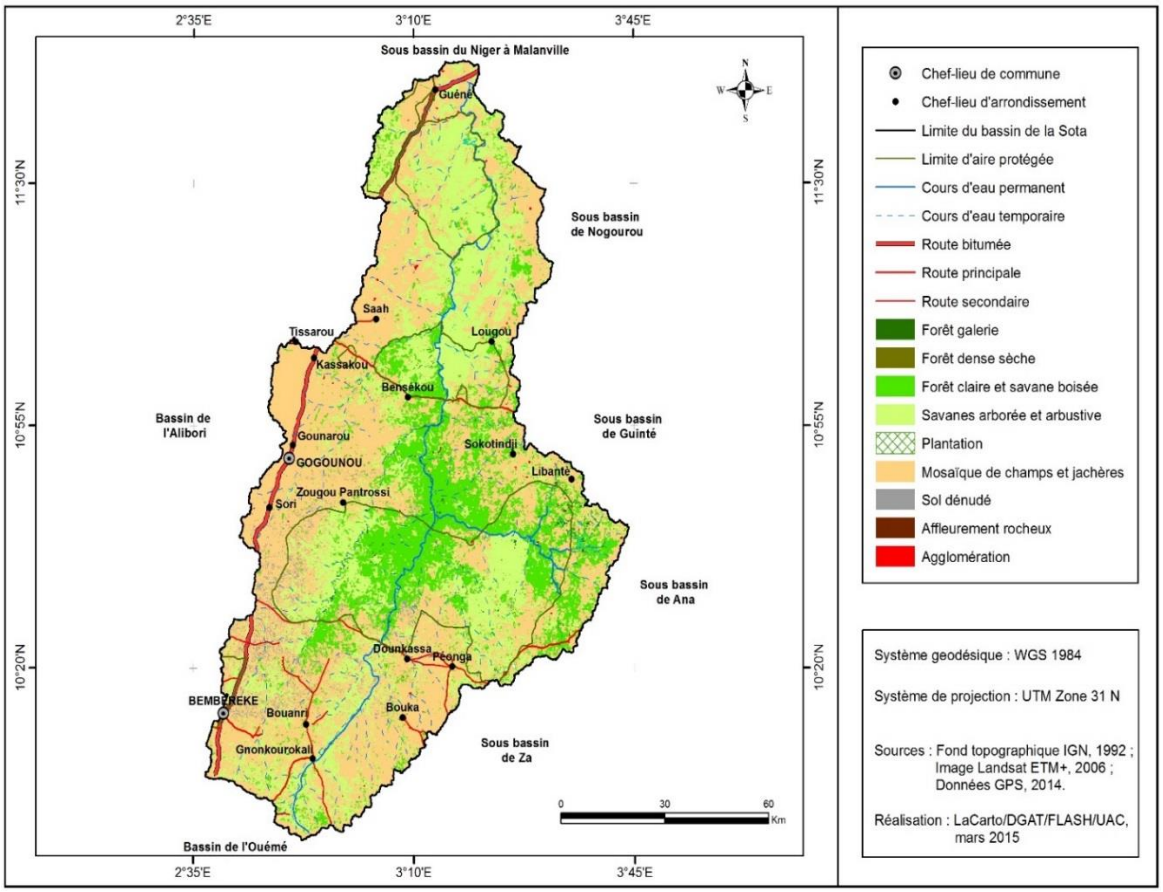


Figure 45 : Occupation future des terres dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050

De l'examen de la figure 45 on note de façon générale que la physionomie du BVS sera probablement dominée par des mosaïques de champs et de jachères, des savanes arborées et arbustives et des îlots de forêts claires et de savanes boisées.

Le tableau XI suivant présente la superficie des unités d'occupation des terres de 2050.

Tableau XI: Superficies des unités d'occupation des terres de 2050

Unités d'occupation des terres	**S (Km²)**	**P (%)**
Forêt galerie	74,11	0,56
Forêt dense sèche	6,45	0,05
Forêt claire et savane boisée	2235,14	16,91
Savanes arborée et arbustive	4598,82	34,79
Plantation	78,41	0,59
Mosaïque de champs et jachères	6138,04	46,44
Surface rocheuse	9,84	0,07
Sol dénudé	28,09	0,21
Agglomération	48,12	0,36
Total	**13217**	**100**

Source : Prédiction de l'occupation des terres à l'horizon 2050

De l'examen du tableau XI, on note que les formations végétales du BVS à l'horizon 2050 sont probablement constituées par ordre d'importance de savanes arborées et arbustives, des mosaïque de champs et jachères et des îlots de forêts claires. En effet, les savanes arborées et arbustives occuperont 34,79 % des formations naturelles du secteur d'étude. Les mosaïques de champs et jachères par contre occuperont 46,44 % des formations anthropiques et les forêts claires et savanes boisées représenteront 16,91 % de la superficie des formations naturelles du secteur d'étude, si toute chose est égale par ailleurs. Les galeries forestières couvriront seulement 0,56 % et se localiseront le long des principaux cours d'eau (Sota) et de ces affluents.

4.3 Impact de l'anthropisation sur les écoulements de surface dans le BVS

L'évolution des coefficients de rétention en eau calculés est présentée dans le tableau XII.

Tableau XII : Evolution des coefficients de rétention (Cr) dans le BVS

Capacité de rétention (Cr)	FG	FDS	FCSB	SASA	PL	MCJ
Cr_1995	10,57	2,20	85,30	73,86	0,06	13,60
Cr_2006	7,61	1,88	52,99	90,04	0,39	22,92
Cr_2013	2,85	0,38	53	73,74	0,44	41,22

Source : Résultat de Traitement des données

A l'examen du tableau XII, on constate globalement une diminution dans le temps du coefficient de rétention pour les classes des forêts et des savanes et son augmentation pour les plantations et mosaïques de champs et jachères. De même, on note que tous les coefficients de rétention sont inférieurs à 100 pour toutes les classes retenues. C'est donc une zone propice aux écoulements de surface avec son corollaire de développement intense de l'érosion. De même, ces faibles valeurs rendent compte d'une forte anthropisation voire d'une dégradation du milieu. Cette prépondérance à l'anthropisation a déjà été relevée par les taux moyens annuels d'expansion spatiale, la vitesse d'évolution et les intensités des changements des différentes unités d'occupation des terres. Le BVS connait donc une tendance à l'anthropisation. Ainsi, les milieux naturels font place aux cultures, agglomérations et sols dénudés. Cet état de fait a pour

conséquence directe une augmentation des écoulements de surface avec probablement une intensification de l'érosion des sols.

4.4 Discussion

A partir des images satellitaires Landsat TM de 1995, ETM+ de 2006 et OLI de 2013, toutes de 30 m de résolution spatiale, la présente étude a permis de montrer l'importance de la Télédétection dans la compréhension des changements spatio-temporels de l'occupation des terres dans le Bassin Versant de la Sota. Dans ce cadre, des cartes d'occupation des terres ont été réalisées pour les années 1995, 2006 et 2013. Les superficies de chaque unité d'occupation ont été également extraites. Les résultats de cette étude ont confirmé ceux des travaux de plusieurs auteurs qui ont aussi reconnu la pertinence de la télédétection dans l'étude de la dynamique des milieux. L'imagerie satellitaire joue alors un rôle incontournable dans le processus de caractérisation et d'aménagement régional des écosystèmes (Maman *et al.,* 2011). Dans le Bassin Versant de la Sota, l'interaction systèmes sociaux et environnementaux s'est soldée par la régression de toutes les formations végétales naturelles au profit des formations anthropisées. Les forêts claires et savanes boisées ont connu la plus grande régression (-4,33 %) avec une intensité de perte de l'ordre de 40 % et une vitesse de -196,76 km²/an. On a assisté aussi à une diminution drastique des forêts galeries (-2,98 %, soit une perte de 28 % et une vitesse de -17,99 km²/an) et des forêts denses sèches (-1,45 %, soit -1,98 km²/an avec une intensité de 39 %). Cette régression des formations végétales naturelles est faite au grand profit des mosaïques de cultures et jachères, des sols dénudés et des agglomérations. La plus grande expansion (4,74 %) est observée pour les champs et jachères avec une vitesse de 113,47 km²/an et une intensité de gain avoisinant les 100 %, tout comme les plantations aussi qui ont progressées de 16,52 % avec une vitesse de 4 km²/an. Ensuite, viennent les agglomérations (1,71 % d'expansion en moyenne l'an, avec une vitesse de progression de 0,56 km²/an et une intensité de gain évaluée à 100 % également puis, les sols dénudés augmentés de 1,72 %, avec une vitesse de 0,18 km²/an une intensité 0 %. Cette forte destruction des forêts galeries et des autres formations végétales naturelles induit le comblement de la rivière Sota et de ses affluents. Les principales causes qui expliquent la dégradation observée sont les défrichements incontrôlés dus aux besoins croissants de superficies cultivables sous l'effet de la

pression démographique; les mauvaises pratiques culturales (extension chronique des surfaces cultivées, disparition de la jachère, feux de végétation abusifs, absence d'apport fertilisant, monoculture, etc.); les prélèvements non contrôlés de bois de feu et de bois d'œuvre avec disparition des essences de valeur et la transhumance. Ces résultats concordent avec ceux de Issifou (2014) dans le district phytogéographique du Borgou-Nord de la région soudanienne du Bénin, de Soro *et al.* (2014) dans la région des lacs au centre de la Côte d'Ivoire, et de Hountondji (2008) en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest. Tous ces auteurs sont parvenus à la même conclusion selon laquelle les formations végétales naturelles diminuent au profit des cultures, des sols dénudés, des agglomérations et accessoirement des plantations. Une fois de plus, c'est la pression humaine qui en est la cause. Les deux composantes étant liées, la dynamique de la végétation est fortement influencée par les impacts anthropozoïques. Toutes choses étant égales par ailleurs, il peut être considéré comme un facteur déterminant de dégradation du milieu naturel. La dynamique de l'occupation des terres montre que les formations végétales denses, par opposition aux formations claires, régressent de façon drastique. Il en résulte un amenuisement de la capacité productive des terres d'année en année. L'extension des terres agricoles en réponse à leur baisse de rendement touche désormais les zones classées et protégées. Dès lors, les zones qui renferment généralement l'essentiel du potentiel agro-sylvo-pastoral se trouvent ainsi soumises à une pression humaine et animale se traduisant par l'extension des terres de cultures de surpâturage, de transhumance et de défrichement (MEHU, 2002).

Cependant, on note une savanisation de la forêt marquée par une extension des savanes arborées et arbustives avec une expansion moyenne annuelle de 1,8 % et une vitesse de progression de 98,52 km²/an en 2006. A partir de cette date il a été observé une conversion concomitante des savanes en formations anthropiques, ce qui témoigne de l'ampleur de la dégradation actuelle des formations végétales (Houndagba, 2015), même si par endroits une tendance à la régénérescence peut être observée. C'est le cas des plantations issues des projets de reboisement en grande partie constituée d'espèces à croissance rapide comme *Gmelina arborea* et *Tectona grandis* communément appelé teck. Cette régénérescence de l'espace naturel a également été relevé dans le Nord-Est

de la Côte d'Ivoire, dans le bassin versant du N'Zi et dans le département de Korhogo (Kouassi, 2007 ; Coulibaly, 2003). Selon Grégoire et Ferrari cités par Kouassi (2007), les modifications affectant la couverture végétale d'un territoire donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. En effet, la nature du couvert intervient sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et ruissellement de surface (Kouassi, 2007). L'ampleur de l'anthropisation de la végétation sur les coefficients d'écoulements dans le secteur d'étude n'a pas été abordée dans cette étude faute d'études plus poussées pour évaluer ce coefficient. Cependant, un indice de rétention a été calculé. Il met en évidence une forte anthropisation et une dégradation de la zone d'étude. En effet, tous les indices de rétention au niveau des différentes classes sont inférieurs à 100. Dans ce cas, elles sont dotées d'une faible capacité de rétention. Par conséquent, l'écoulement de surface est important et les phénomènes d'érosion hydrique dans le bassin versant auront tendance à se développer. Une évolution semblable a été observée dans le bassin versant du Lafigué au nord de la Côte d'Ivoire (Cecchi *et al.,* 2009).

Les cartes d'occupation des terres réalisées ont permis de mettre en évidence la tendance générale de la dynamique de l'occupation des terres. Cette tendance générale révèle une augmentation de la superficie des formations anthropiques (champs et jachères, agglomérations, plantations) au détriment des formations végétales naturelles (forêts, savanes). Vodounnon (2010) était déjà parvenue à la même conclusion concernant le bassin versant de la Sota. Plus inquiétant, cette tendance de dégradation de la couverture végétale n'épargne même pas les aires protégées du bassin versant comme Gounou N'gobi (2012) a pu le montrer en étudiant les impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur la forêt classée de la Sota et sa zone riveraine. Les résultats des travaux de nombreux auteurs ont montré que la situation de dégradation des formations végétales naturelles du bassin versant de la Sota n'est pas une particularité au Bénin. Ainsi par exemple, les bassins versants de la Mékrou, de l'Alibori et de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou étudiés respectivement par Ahouansou (2010), Boko (2012) et Akognongbé (2014) connaissent aussi le recul continu de leurs formations

végétales naturelles au profit des formations anthropisées. De même, en Côte d'Ivoire, Kouassi *et al.* (2008) ont montré que le bassin versant de N'zi se caractérise par une forte diminution des surfaces boisées et une importante augmentation des terres destinées aux cultures et pâturages.

Conclusion partielle

La dynamique de l'occupation des terres qui a fait l'objet de ce chapitre 4 a révélé que de 1995 à 2013 que les changements globaux identifiés de l'analyse des résultats obtenus indiquent qu'il y a une forte dégradation des formations végétales naturelles marquée par une régression des superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses sèches ; une savanisation marquée par la conversion des jachères en savanes arborées et arbustives ; une forte anthropisation du milieu naturel marquée par une augmentation des zones de culture, des sols dénudés et des agglomérations dans le BVS. Les programmes ''Pontius Matrix22'' et ''Intensity Analysis02'' de Aldwaik et de Pontius ont permis de mesurer les intensités des changements et les vitesses de ces changements au niveau des catégories d'occupation des terres sur les deux intervalles de temps (1995-2006 et 2006-2013). Ces vitesses ont été dans l'ensemble rapides. Les variations de valeurs confirment l'état de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres entre 1995, 2006 et 2013. A ce rythme, il va de soi qu'à l'horizon 2050, les formations naturelles connaîtront davantage une régression des superficies.

TROISIEME PARTIE : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DES ESSENCES FOURRAGERES ET VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS

La troisième partie de la thèse comprend les chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 est principalement consacré aux incidences de la dynamique climatique sur la distribution de quatre espèces fourragères du bassin versant de la Sota. Les techniques de modélisations des habitats écologiques des espèces fourragères ont été exploitées. Le chapitre 6 s'intéresse à l'évaluation et à la spatialisation de la vulnérabilité des parcours naturels à l'horizon 2050 au niveau du bassin versant de la Sota face aux effets liés aux changements climatiques.

CHAPITRE 5 : IMPACT DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DE QUATRE ESPECES FOURRAGERES DU BVS

Le chapitre 5 présente les résultats du calage du modèle Maxent, la validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future des espèces fourragères et la discussion.

5.1 Description botanique des quatre espèces fourragères

La description botanique des espèces étudiées a été faite à partir des documents de Arbonier (2002) et de Akoègninou *et al*. (2006). Les principales caractéristiques prises en compte dans cette description concernent : le port, l'écorce, la feuille, la fleur, le fruit, la graine, la période de floraison, le préférendum écologique et la répartition géographique.

5.1.1 *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss

Khaya senegalensis est un ligneux des savanes soudaniennes et guinéennes. Il préfère les sols profonds et bien drainés, mais s'adapte aussi aux sols superficiels et latéritiques. C'est un grand arbre, de 25-35 m de haut, à fût généralement court et trapu, mais pouvant atteindre 10 m de haut et 2 m de diamètre, parfois avec un faible empattement à la base, à cime arrondie et dense, avec les feuilles disposées au bout des rameaux. Son écorce est grise et lisse, devenant plus ou moins ferrugineuse et écailleuse, à tranche rose plus ou moins carmin, exsudant un peu de liquide (photo 1.1).

Les feuilles sont alternes, paripennées (parfois imparipennées), glabres, à 3-4 (-6) paires de folioles opposées ou subopposées, oblongues à oblongues elliptiques, de 5-12 x 3-5 cm, à sommet arrondi, obtus ou plus ou moins acuminé, à base en coin ou atténuée, grisâtres en dessous (photo 1.2).

La fleur est de couleur blanchâtre, pédicellée (2-4 mm), de 7-8 mm de diamètre, à 4(-5) pétales étalés portant au centre les étamines rouges réunies en tube (photo 1.3).

Le fruit est dressé vers le haut, globuleux, ligneux, de 5-10 cm de diamètre, gris clair à maturité, s'ouvrant en 4 valves en commençant par le sommet et contenant des graines plates (photo 1.2).

Les graines sont plates, rectangulaires, ailées et plus ou moins boursouflées. La floraison a lieu plutôt en première partie de saison sèche. Son port, lorsqu'il est jeune, ressemble

à celui d'un jeune *Ekebergia senegalensis.* Son aire de répartition s'étend du Sénégal au Cameroun, jusqu'au Soudan.

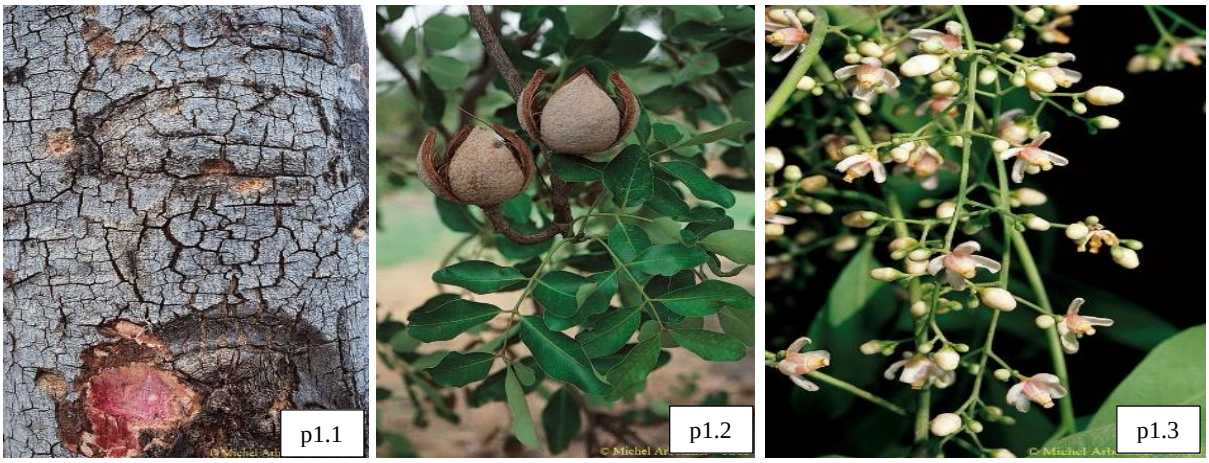


Planche 1 : Quelques organes de *Khaya senegalensis*

Source : Arbonier (2002)

Légende : photo1.1 : écorce ; photo1.2 : feuille et fruit ; photo1.3 : fleur

5.1.2 *Afzelia africana* Smith ex Pers

Afzelia africana est une espèce ligneuse des savanes soudaniennes, des galeries forestières, sur sols sableux profonds et sols alluvionnaires. Il est de la famille des césalpiniacées. C'est un grand arbre à cime dense, large et étalée, de 25-30 (-35) m de haut, à fût droit souvent court et trapu (parfois plus de 1 m de diamètre), à branches massives. L'écorce est grise plus ou moins foncée, plus ou moins fissurée et lamelleuse, s'écaillant en plaques, laissant apparaître des zones gris clair, à tranche rose à brun clair, granuleuse (photo 2.1).

Les feuilles sont alternes, paripennées, jusqu'à 30 cm de long, à (3-) 4-5 (-8) paires de folioles opposées ou subopposées, glabres et luisantes, vert foncé dessus, largement espacées sur le rachis. Les limbes sont elliptiques ou ovales, de 5-15 x 3,5-8,5 cm, à sommets obtus ou en pointe courte, courtement mucronés, à bases arrondies ou en coin (photo 2.2). La fleur est de couleur blanchâtre souvent striée de pourpre, parfumée, à 3 pétales supérieurs elliptiques de 10-12 mm de long et 1 pétale inférieur à 2 lobes arrondis divergents (planche 2.3). Le fruit est une gousse aplatie ligneuse, glabre, de 10-18 x 6-8 cm, épaisse de 2-5 cm, à 2 valves noires, longtemps persistante sur l'arbre, contenant 7-10 graines (photo 2.4). Les graines sont noires, lisses et plus ou moins brillantes, portant à sa base un arille orange. La floraison de l'espèce a lieu en saison des pluies.

Afzelia africana est une espèce commune, localement abondante et grégaire. Son aire de distribution s'étend du Sénégal au Cameroun, jusqu'en Ouganda et Tanzanie.

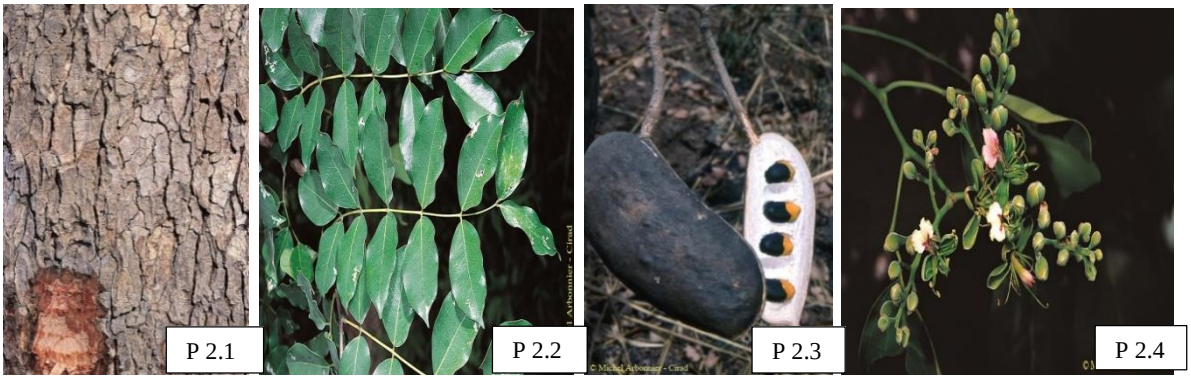


Planche 2 : Quelques organes de *Afzelia africana*

Source : Arbonier (2002)

Légende : photo 2.1 : écorce ; photo 2.2 : feuille ; photo 2.3 : fruit ; photo 2.4 : fleur

5.1.3 *Pterocarpus erinaceus* Poir

Pterocarpus erinaceus est un arbre des savanes soudano-guinéennes et guinéennes, sur tous types de sol de hauteur variable (8-12 (-15) m), à fût droit et cylindrique atteignant 1 m de diamètre et à cime arrondie et ouverte. L'écorce est de couleur noirâtre, crevassée et très lamelleuse, à tranche brune striée de rouge exsudant une résine translucide rougeâtre (photo 3.1). Les feuilles sont alternes, imparipennées, à 3-5 (-7) paires de folioles alternes, finement pubescentes en dessous devenant glabres, de forme variable, ovales à elliptiques, de 6-11 x 3-6 cm, à sommet arrondi ou obtus généralement échancré, à base arrondie (photo 3.2).

La fleur est jaune d'or devenant jaune pâle, asymétrique, odorante, de 10-12 mm de long, pédicellée, à pétales gaufrés, à calice pubescent à 5 dents courtes (photo 3.3).

Le fruit est samare plate, entourée d'une aile circulaire membraneuse et plus ou moins plissée, portant sur les deux faces de la graine de nombreux poils épineux, rigides et enchevêtrés, de 4-7 cm de diamètre, jaune paille à maturité, persistant longtemps sur l'arbre (photo 3.4).

La floraison et la fructification ont lieu en saison sèche, toujours avant la feuillaison. Son aire de répartition s'étend du Sénégal au Cameroun et à la république centrafricaine. Disséminée, commune et localement grégaire, *Pterocarpus erinaceus* est une espèce

localement menacée par son intense exploitation pastorale et artisanale, qui la rend de moins en moins commune par endroits.



Planche 3 : Quelques organes de *Pterocarpus erinaceus*

Source : Arbonier (2002)

Légende : photo 3.1 : écorce ; photo 3.2 : feuille ; photo 3.3 : fleur ; photo 3.4 : fruit

5.1.4 *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch

Daniellia oliveri est un grand arbre des savanes soudaniennes et guinéennes, sur tous types de sol à cime étalée (en cône renversé) et assez dense, de 15-20 (-25) m de haut, souvent bas branchu, à fût droit blanc-gris.

Son écorce est écailleuse et se desquamant par plaques plus ou moins circulaires, grise à tranche rouge foncé striée de blanc (photo 4.1).

Les feuilles sont alternes, paripennées atteignant 45 (-50) cm de long, à 4-9 (11) paires de folioles opposées ou subopposées. Les limbes sont ovales elliptiques, de 6-15 x 3,5-7,5 cm, à sommets courtement acuminés, à bases asymétriques en coin ou largement arrondies ou subcordées, criblés de points translucides le long de la marge (photo 4.2). Les jeunes feuilles sont légèrement pubescentes avec des points translucides plus visibles.

La fleur est blanche ou blanc verdâtre devenant crème, comprenant 4 sépales et 1 (-2) grand pétale et 10 étamines dépassant les pétales (photo 4.3). La floraison a lieu en première moitié de saison sèche, lorsque l'arbre est sans feuilles, ou à la feuillaison.

Les fruits se présentent sous forme de gousse plate obovale à 2 valves papyracées rigides de 5-10 x 2,5-5 cm, beige. Quant aux graines, elles sont brunes, obovales et plus ou moins plates, pendante et retenues à une des valves par un funicule de 12-15 mm (photo 4.4).

Daniellia oliveri est réparti du Sénégal au Cameroun, jusqu'au Soudan, au Congo et en Angola. Sa distribution est irrégulière et localement très commune.

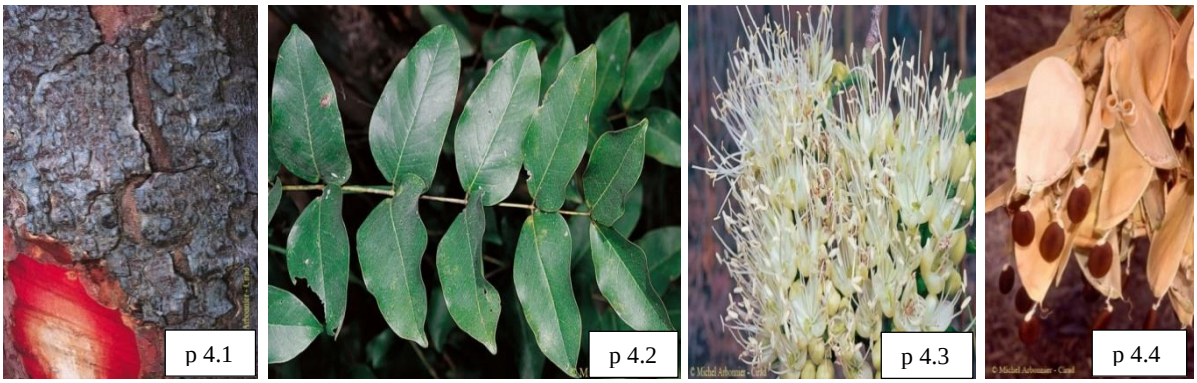


Planche 4 : Quelques organes de *Daniellia oliveri*

Source : Arbonier (2002)

Légende : photo 4.1 : écorce ; photo 4.2 : feuille ; photo 4.3 : fleur ; photo 4.4 : fruit

5.2 Justification du choix des quatre espèces fourragères

Les espèces ligneuses fourragères étudiées (*Khaya senegalensis*, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri*) sont parmi les plus appétés par le bétail au Bénin. Selon UICN (2008), les trois premières cités sont classées comme espèces vulnérables ; et pour plusieurs auteurs (Koukoubou, 2008 et FAO, 2005) *Daniellia oliveri* est une espèce menacée en Afrique de l'Ouest. Il serait intéressant d'analyser leur vulnérabilité aux changements climatiques.

5.3 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future des espèces fourragères

Les espèces fourragères concernées sont : *Khaya senegalensis*, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri*. Ces espèces ont été choisies compte tenu de leur abondance et de leur niveau d'appétence.

5.3.1 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Khaya senegalensis*

La figure 46 présente les statistiques de l'AUC issues des modèles de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Khaya senegalensis* des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota.

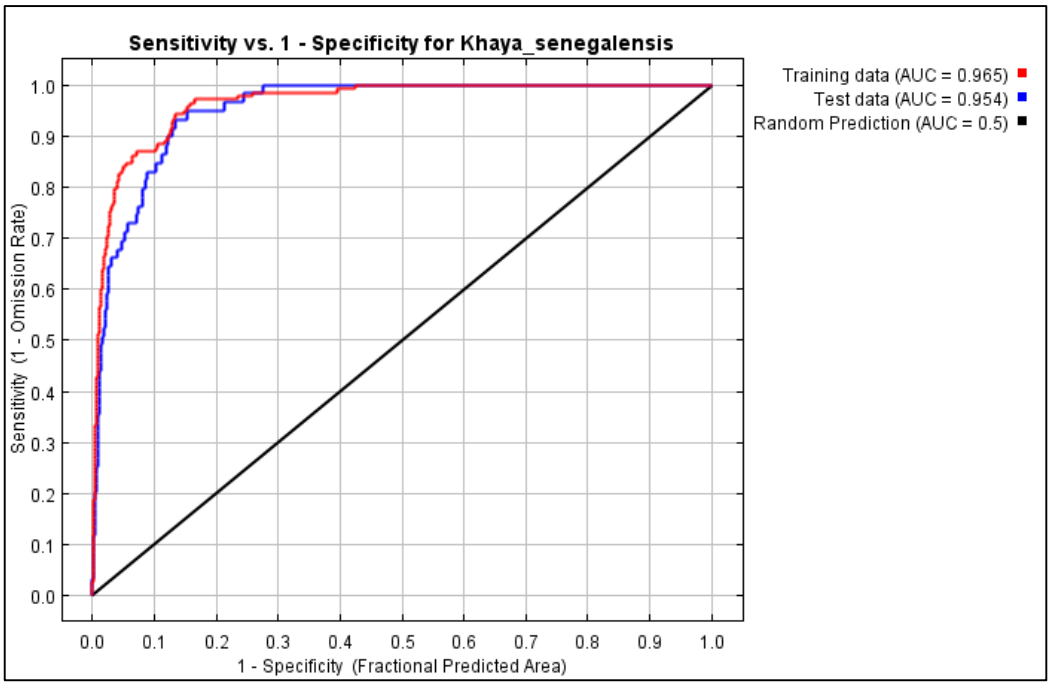


Figure 46 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Khaya senegalensis*

Source : Résultat de Traitement des données

L'analyse de la figure 46 indique que les valeurs de calibration et du test de l'AUC sont respectivement de 0,97 et de 0,95. Ces valeurs indiquent que le modèle de prédiction de *K. senegalensis* est performant.

✓ **Contribution des variables environnementales utilisée pour *Khaya. senegalensis***

La figure 47 présente le test de Jackknife sur l'importance des variables individuelles utilisées dans le modèle de prédiction. Ce test a permis de déterminer les variables qui ont le plus contribué à la prédiction du modèle.

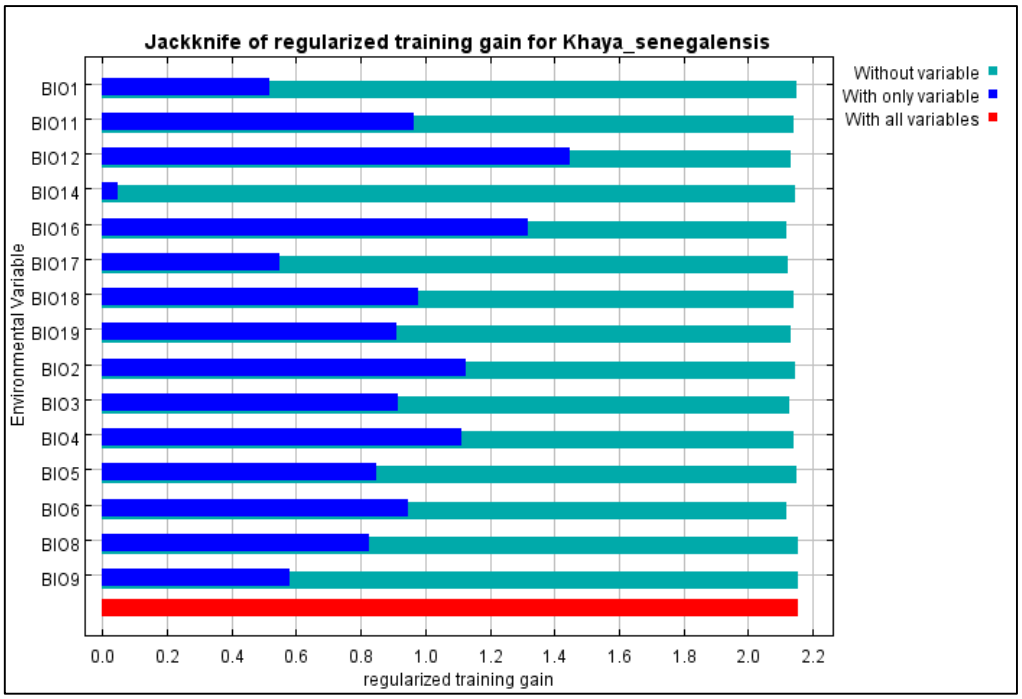


Figure 47 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Khaya senegalensis*

Source : Résultat de Traitement des données

Légendes

Bio_1 : Température moyenne annuelle ;
Bio_2 : Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)]
Bio_3 : Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle ;
Bio_4 : Saisonnalité de la température (écart-type *100)
Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud
Bio_6 : Température minimale du mois le plus froid ;
Bio_7 : Variation annuelle de température ;
Bio_8 : Température moyenne du trimestre le plus humide ;
Bio_9 : Température moyenne du trimestre le plus sec ;
Bio_10 : Température moyenne du trimestre le plus chaud ;
Bio_11 : Température moyenne du trimestre le plus froid ;
Bio_12 : Précipitation annuelle
Bio_13 : Précipitation du mois le plus humide
Bio_14 : Précipitation du mois le plus sec
Bio_15 : Saisonnalité de la précipitation (coefficient de variation)
Bio_16 : Précipitation du trimestre le plus humide
Bio_17 : Précipitation du trimestre le plus sec
Bio_18 : Précipitation du trimestre le plus chaud
Bio_19 : Précipitation du trimestre le plus froid

De l'analyse de la figure 47, il ressort que les variables environnementales individuelles telles que le BIO12 (Précipitation annuelle), le BIO16 (Précipitation du trimestre le plus humide), le BIO2 (Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle

(max température – mini température)]) et le BIO4 (Saisonnalité de la température (écart-type *100)) ont beaucoup plus contribué à la prédiction du modèle de distribution.

- ✓ **Aires de distribution actuelle et future des habitats favorables à *Khaya senegalensis***

Le tableau XIII présente la variation de la superficie des aires favorables à la présence actuelle et future de *Khaya senegalensis* et la figure 48 présente la carte de spatialisation de ces aires dans le bassin de la Sota.

Tableau XIII : Variation de la superficie des aires favorables à *Khaya senegalensis*

Modèles	Aire très favorable		Aire favorable		Aire peu favorable	
	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)
Présent	10625	-	3825	-	1625	-
CCCMA	10975	3,29	1650	-56,86	3450	112,31
HadCM3	2200	-79,29	4800	25,49	9075	458,46
CSIRO	2950	-72,24	4225	10,46	8900	447,69

Les résultats du modèle CCCMA (tableau XIII), indique que les aires actuellement très favorables à *Khaya senegalensis* connaitront une augmentation de 3,29 % de leur superficie à l'horizon 2050. Les aires actuellement peu favorables connaitront une augmentation de 112,31 %. Par contre, les aires favorables connaitront une diminution de près de 57 %.

Le modèle HadCM3 indique une diminution d'environ 79 % des aires actuellement très favorables et une augmentation de 25,49 % des aires favorables. Par ailleurs, les aires peu favorables connaitront une augmentation d'environ 458 % à l'horizon 2050.

Quant à la prédiction du modèle CSIRO, on note une diminution de 72,24 % des aires actuellement très favorables. Par contre, les aires favorables et peu favorables présentent respectivement une augmentation de 10,46 % et de 448 % à l'horizon 2050.

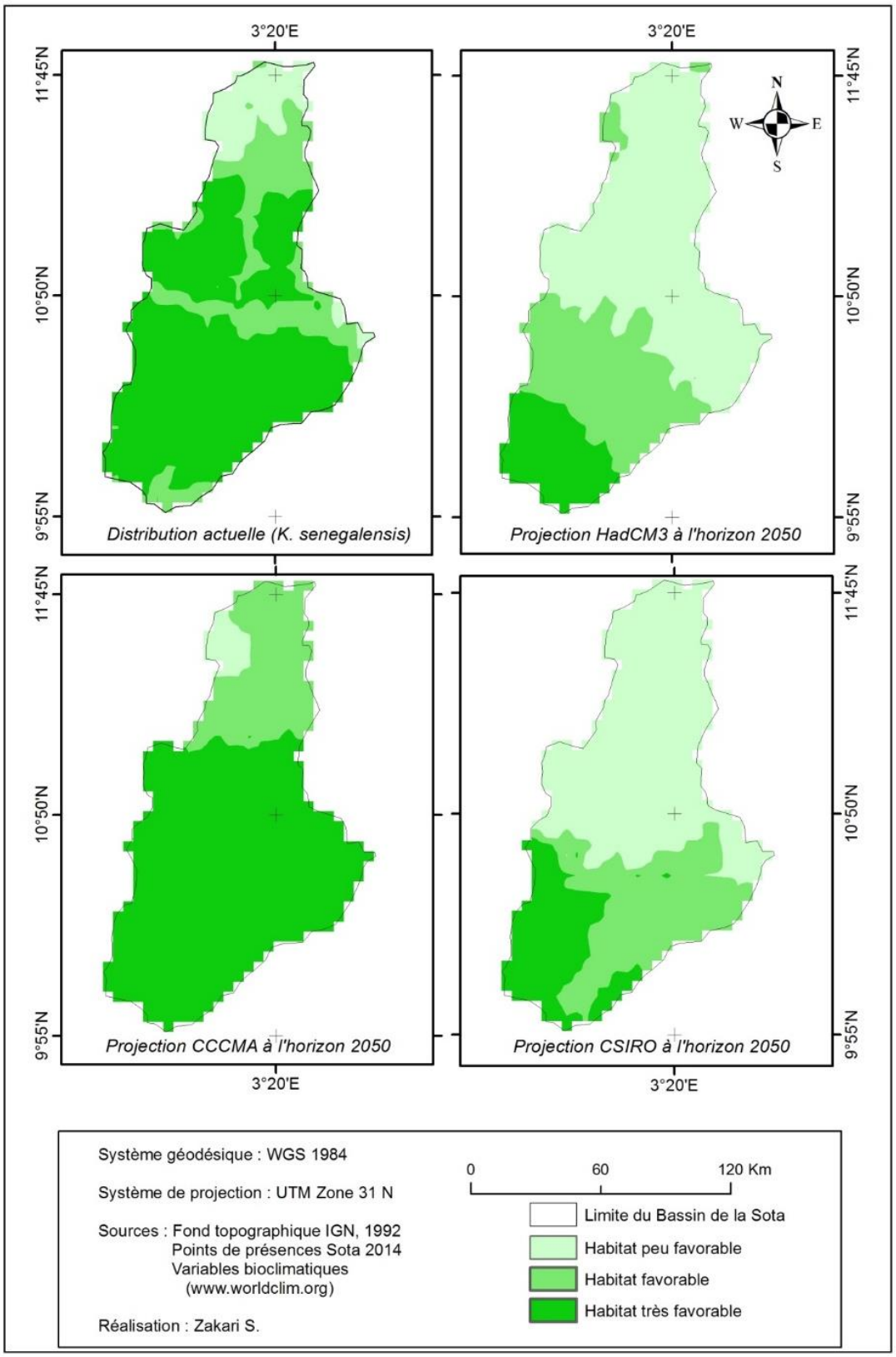


Figure 48 : Spatialisation des aires favorables à *Khaya senegalensis* dans le bassin de la Sota

5.3.2 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Afzelia africana*

La figure 49 présente les statistiques de l'AUC issues des modèles de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Afzelia africana* des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota.

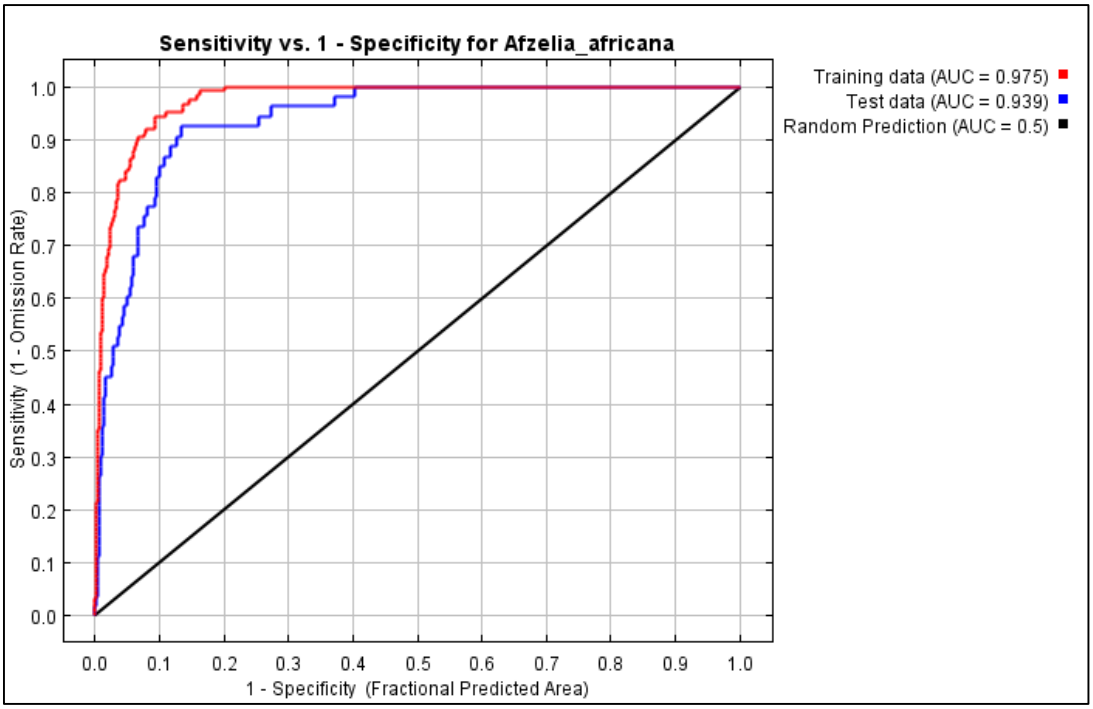


Figure 49 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Afzelia africana*

Source : Résultat de Traitement des données

L'analyse de la figure 49 indique que les valeurs de calibration et du test de l'AUC sont respectivement de 0,98 et de 0,94. Ces valeurs indiquent que le modèle de prédiction de *Afzelia*. *africana* est performant.

- ✓ **Contribution des variables environnementales utilisée pour *Afzelia africana***

La figure 50 présente le test de Jackknife sur l'importance des variables individuelles utilisées dans le modèle de prédiction. Ce test a permis de déterminer les variables qui ont le plus contribué à la prédiction du modèle.

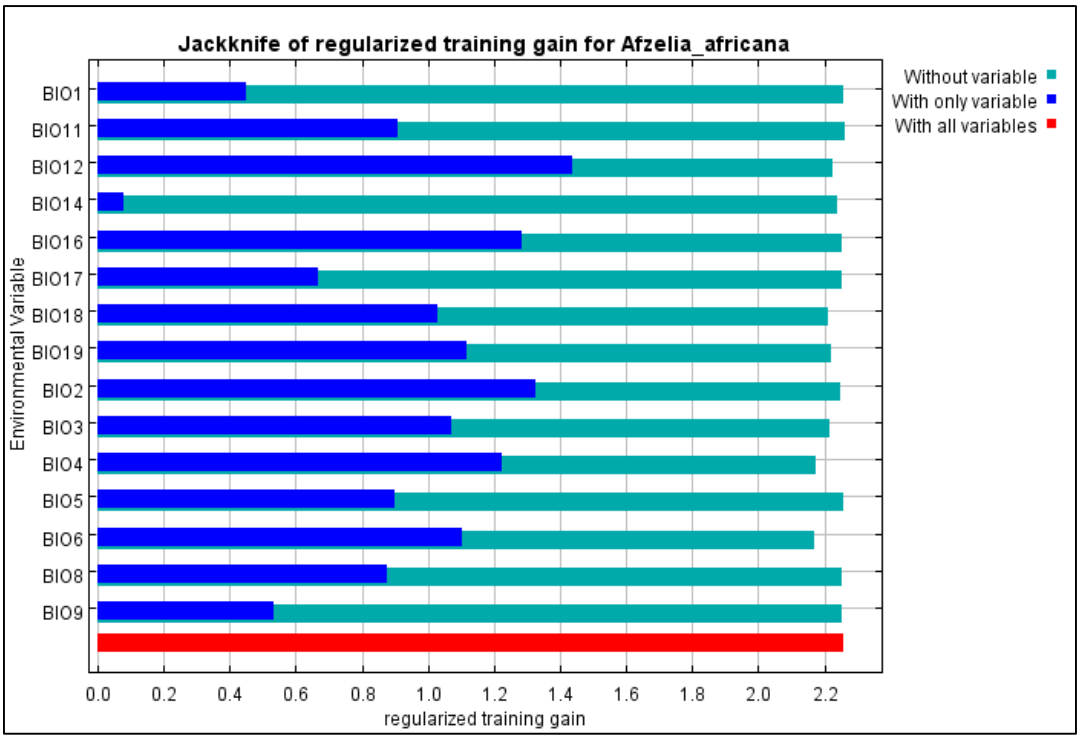


Figure 50 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Afzelia africana*

Source : Résultat de Traitement des données

Légende
Bio_1 : Température moyenne annuelle ;
Bio_2 : Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)] ;
Bio_3 : Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle ;
Bio_4 : Saisonnalité de la température (écart-type *100) ; Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud ; Bio_6 : Température minimale du mois le plus froid ;
Bio_7 : Variation annuelle de température ;
Bio_8 : Température moyenne du trimestre le plus humide ;
Bio_9 : Température moyenne du trimestre le plus sec ;
Bio_10 : Température moyenne du trimestre le plus chaud ;
Bio_11 : Température moyenne du trimestre le plus froid ;
Bio_12 : Précipitation annuelle
Bio_13 : Précipitation du mois le plus humide
Bio_14 : Précipitation du mois le plus sec
Bio_15 : Saisonnalité de la précipitation (coefficient de variation)
Bio_16 : Précipitation du trimestre le plus humide
Bio_17 : Précipitation du trimestre le plus sec
Bio_18 : Précipitation du trimestre le plus chaud
Bio_19 : Précipitation du trimestre le plus froid

De l'analyse de la figure 50, il ressort que les variables environnementales individuelles telles que le BIO12 (Précipitation annuelle), le BIO2 (Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)]), le BIO16 (Précipitation du trimestre le plus humide), le BIO4 (Saisonnalité de la

température (écart-type *100) ; Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud), le BIO6 (Température minimale du mois le plus froid), le BIO3 (Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle), le BIO19 (Précipitation du trimestre le plus froid) et le BIO18 (Précipitation du trimestre le plus chaud) ont beaucoup plus contribué à la prédiction du modèle de distribution.

- ✓ **Aires de distribution actuelle et future des habitats favorables à *Afzelia africana***

Le tableau XIV présente la variation de la superficie des aires favorables à la présence actuelle et future de *Afzelia africana* et la figure 51 présente la carte de spatialisation de ces aires dans le bassin de la Sota.

Tableau XIV : Variation de la superficie des aires favorables à *Afzelia africana*

Modèles	Aire très favorable		Aire favorable		Aire peu favorable	
	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)
Présent	7800	-	5000	-	3275	-
CCCMA	8600	10,26	6000	20	1475	-54,96
HadCM3	2975	-61,86	5850	17	7250	121,37
CSIRO	10050	28,85	3225	-35,5	2800	-14,50

Le modèle CCCMA indique une augmentation de 10,26 % de la superficie des aires très favorables pour *Afzelia africana* à l'horizon 2050 (tableau XIV). Les aires actuellement favorables connaitront une augmentation de 20 % de leur superficie ; par contre celles peu favorables connaitront une diminution de 55 %.

Avec le modèle HadCM3, les aires actuellement très favorables à *Afzelia africana* connaitront une diminution de 62 % de leur superficie. Par contre, les aires favorables et peu favorables connaitront connaîtront respectivement une augmentation de 17 % et de 121 % de leurs superficies à l'horizon 2050.

Quant au modèle CSIRO, une augmentation de 29 % de la superficie des aires actuellement très favorables sera observée. Les aires favorables et peu favorables connaitront respectivement une diminution de 36 % et une augmentation de 15 % à l'horizon 2050.

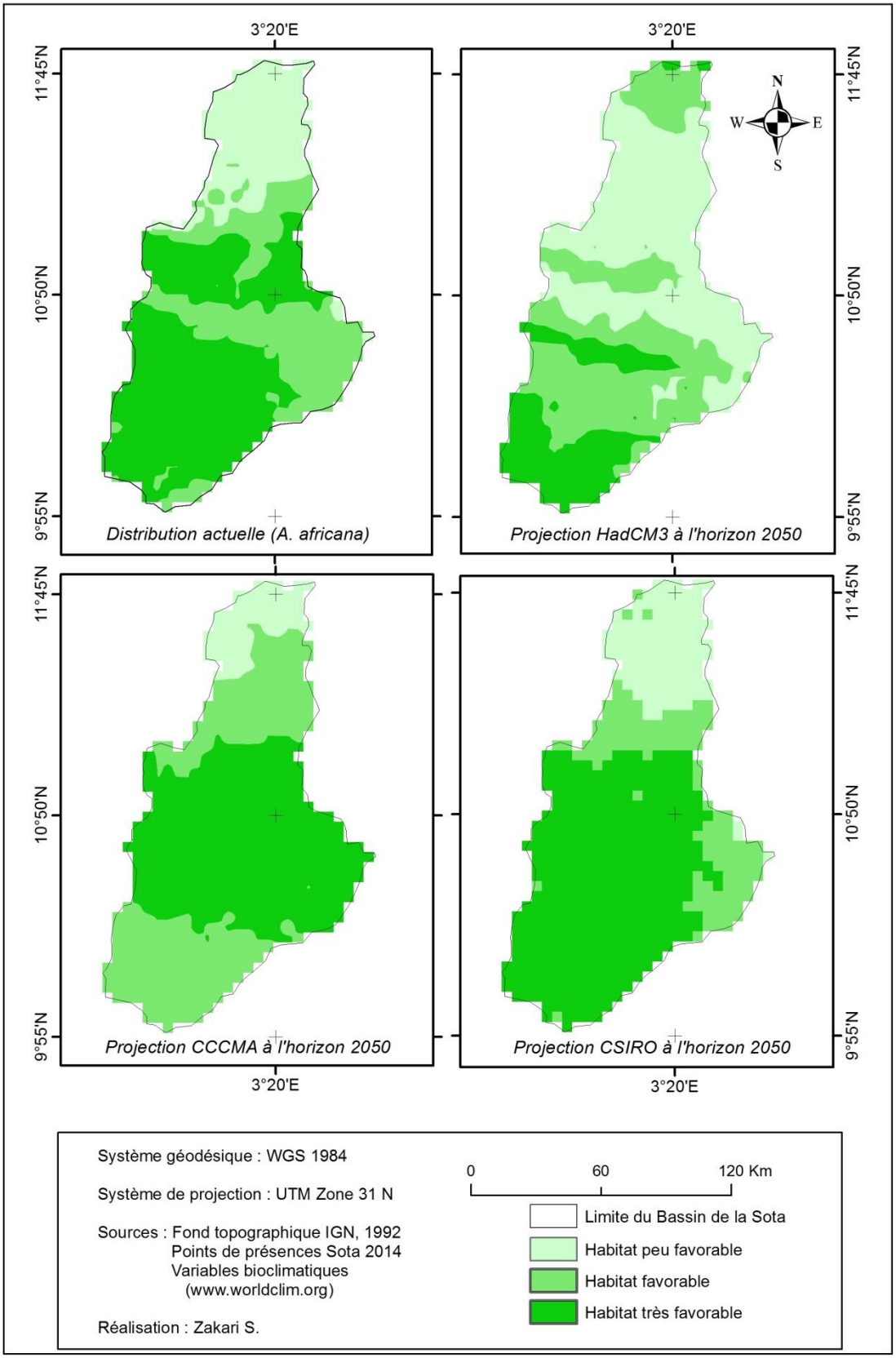


Figure 51 : Spatialisation des aires favorables à *Afzelia africana* dans le bassin de la sota

5.3.3 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Pterocarpus erinaceus*

La figure 52 présente la statistique de l'AUC issue des modèles de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Pterocarpus erinaceus* des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota.

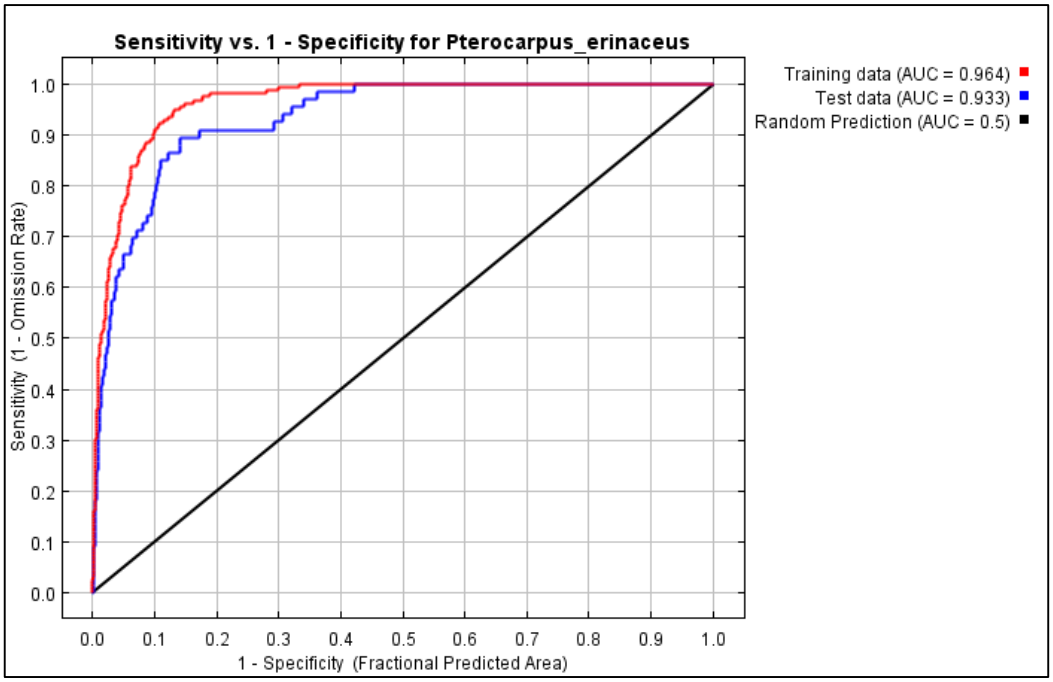


Figure 52 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Pterocarpus erinaceus*

Source : Résultat de Traitement des données

L'analyse de la figure 52 indique que les valeurs de calibration et du test de l'AUC sont respectivement de 0,96 et de 0,93. Ces valeurs indiquent que le modèle de prédiction de *Pterocarpus erinaceus* est performant.

- ✓ **Contribution des variables environnementales utilisée pour *Pterocarpus erinaceus***

La figure 53 présente le test de Jackknife sur l'importance des variables individuelles utilisées dans le modèle de prédiction. Ce test a permis de déterminer les variables qui ont le plus contribué à la prédiction du modèle.

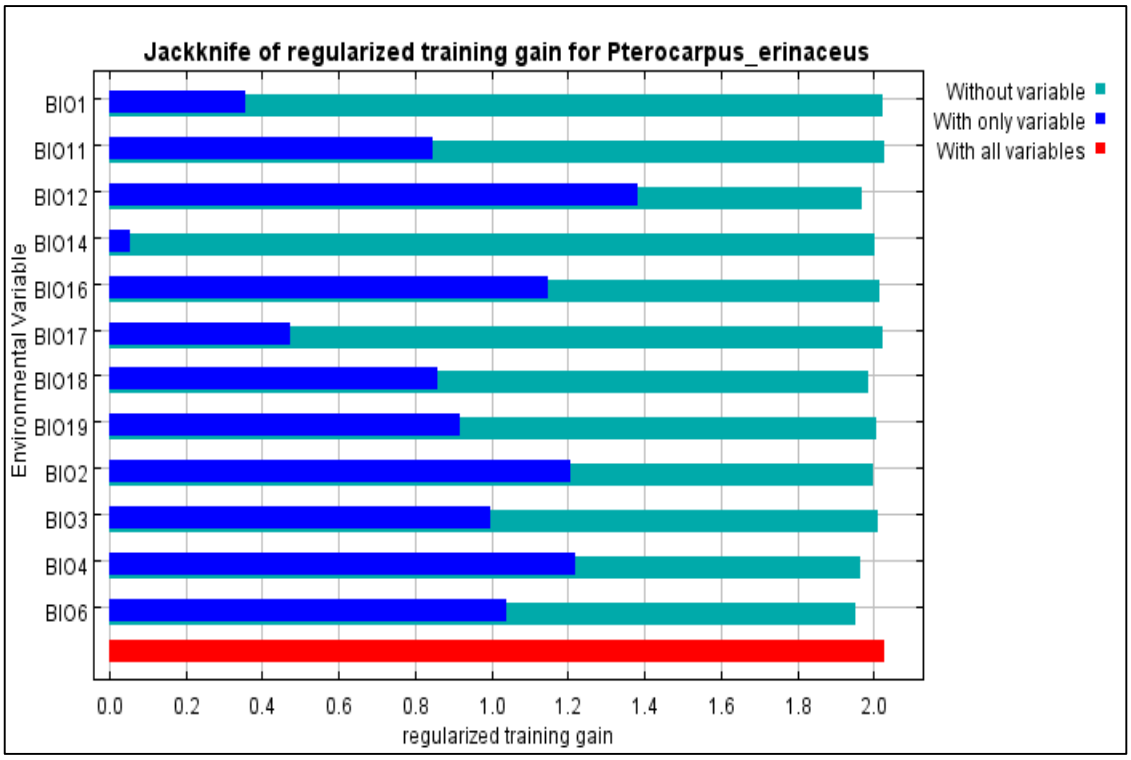


Figure 53 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Pterocarpus erinaceus*

Source : Résultat de Traitement des données

Légende
Bio_1 : Température moyenne annuelle ;
Bio_2 : Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)] ;
Bio_3 : Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle ;
Bio_4 : Saisonnalité de la température (écart-type *100) ; Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud ; Bio_6 : Température minimale du mois le plus froid ;
Bio_7 : Variation annuelle de température ;
Bio_8 : Température moyenne du trimestre le plus humide ;
Bio_9 : Température moyenne du trimestre le plus sec ;
Bio_10 : Température moyenne du trimestre le plus chaud ;
Bio_11 : Température moyenne du trimestre le plus froid ;
Bio_12 : Précipitation annuelle
Bio_13 : Précipitation du mois le plus humide
Bio_14 : Précipitation du mois le plus sec
Bio_15 : Saisonnalité de la précipitation (coefficient de variation)
Bio_16 : Précipitation du trimestre le plus humide
Bio_17 : Précipitation du trimestre le plus sec
Bio_18 : Précipitation du trimestre le plus chaud
Bio_19 : Précipitation du trimestre le plus froid

De l'analyse de la figure 53, il ressort que les variables environnementales individuelles telles que le BIO12 (Précipitation annuelle), le BIO4 (Saisonnalité de la température (écart-type *100) ; Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud), le BIO2

(Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)]), le BIO16 (Précipitation du trimestre le plus humide) et le BIO6 (Température minimale du mois le plus froid) ont beaucoup plus contribué à la prédiction du modèle de distribution.

- ✓ **Aires de distribution actuelle et future des habitats favorables à *Pterocarpus erinaceus***

Le tableau XV présente la variation de la superficie des aires favorables à la présence actuelle et future de *Pterocarpus erinaceus* et la figure 54 présente la carte de spatialisation de ces aires dans le bassin de la Sota.

Tableau XV : Variation de la superficie des aires favorables à *Pterocarpus erinaceus erinaceus*

Modèles	Aire très favorable		Aire favorable		Aire peu favorable	
	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)
Présent	7950	-	5325	-	2800	-
CCCMA	8775	10,38	5225	-1,88	2075	-25,89
HadCM3	3450	-56,60	9900	85,92	2725	-2,68
CSIRO	2525	-68,24	10200	91,55	3350	19,64

De l'analyse du tableau XV, il ressort que le modèle CCCMA indique une augmentation de près de 10 % de la superficie des aires actuellement très favorables à *Pterocarpus erinaceus* à l'horizon 2050. Celles des aires favorables et peu favorables connaitront respectivement une diminution de 2 % et de 26 %.

Le modèle HadCM3 indique une diminution de 57 % de la superficie des aires actuellement très favorables. Par contre, on note une augmentation de 86 % et une diminution de 3 % respectivement au niveau des aires favorables et peu favorables.

Avec le modèle CSIRO, on a une diminution de 68 % au niveau des aires très favorables. Les aires favorables et peu favorables seront respectivement caractérisées par une augmentation de 92 % et de 20 % (figure 54).

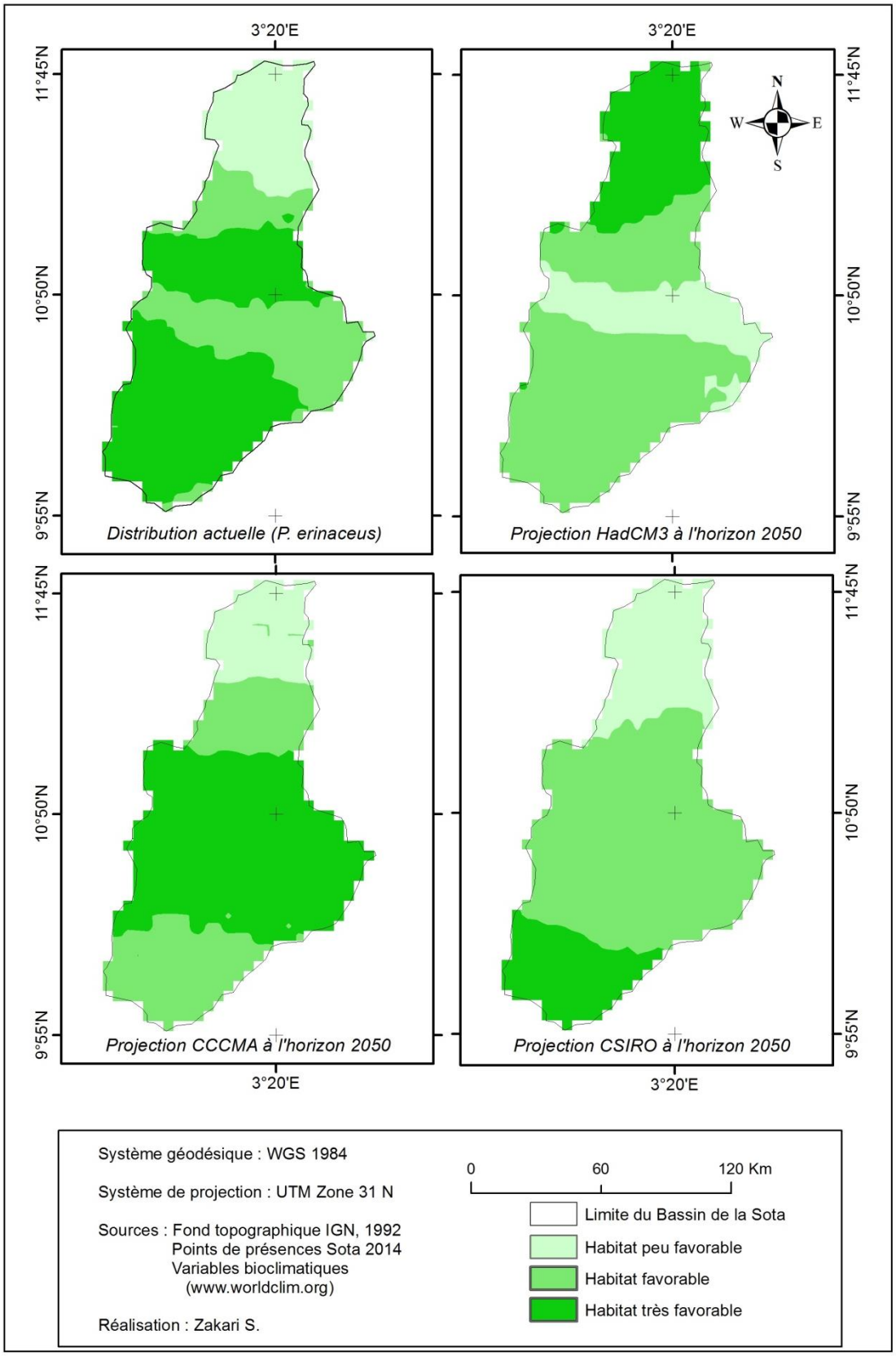


Figure 54 : Spatialisation des aires favorables à *Pterocarpus erinaceus* dans le bassin de la Sota

5.3.4 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Daniellia oliveri*

La figure 55 présente la statistique de l'AUC issue des modèles de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Daniellia oliveri* des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota.

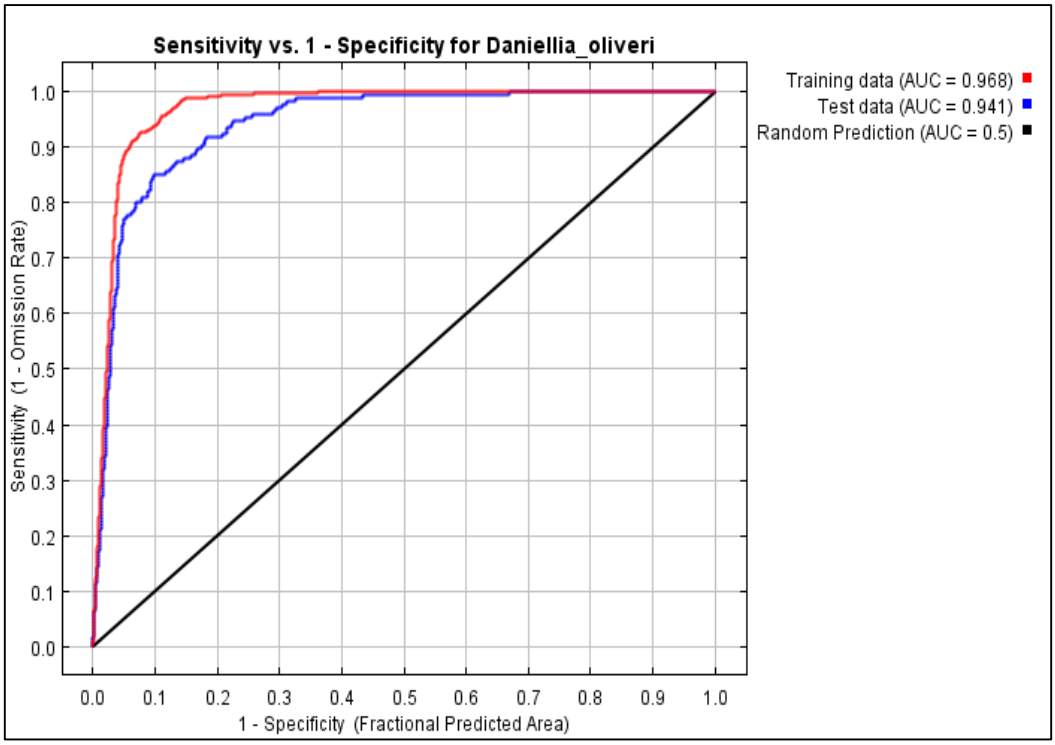


Figure 55 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Daniellia oliveri*

Source : Résultat de Traitement des données

L'analyse de la figure 55 indique que les valeurs de calibration et du test de l'AUC sont respectivement de 0,97 et de 0,94. Ces valeurs indiquent que le modèle de prédiction de *Daniellia oliveri* est performant.

- ✓ **Contribution des variables environnementales utilisées pour *Daniellia oliveri***

La figure 56 présente le test de Jackknife sur l'importance des variables individuelles utilisées dans le modèle de prédiction. Ce test a permis de déterminer les variables qui ont le plus contribué à la prédiction du modèle.

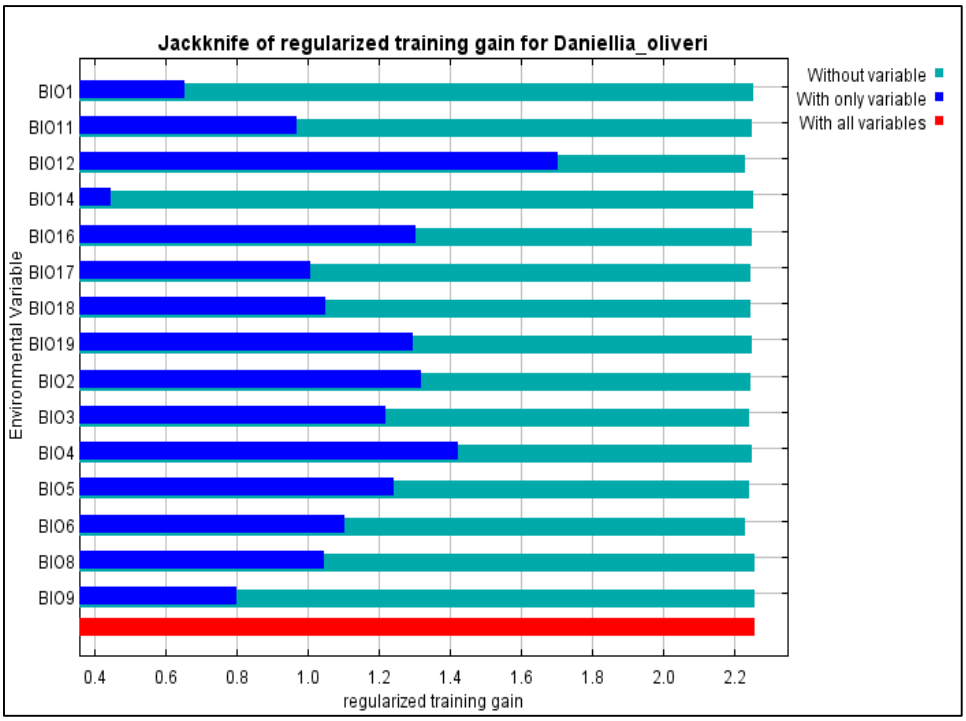


Figure 56 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Daniellia oliveri*

Source : Résultat de Traitement des données

Légende
Bio_1 : Température moyenne annuelle ;
Bio_2 : Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)] ;
Bio_3 : Ratio de l'amplitude thermique journalière sur l'amplitude thermique annuelle ;
Bio_4 : Saisonnalité de la température (écart-type *100)
Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud
Bio_6 : Température minimale du mois le plus froid
Bio_7 : Variation annuelle de température ;
Bio_8 : Température moyenne du trimestre le plus humide ;
Bio_9 : Température moyenne du trimestre le plus sec ;
Bio_10 : Température moyenne du trimestre le plus chaud ;
Bio_11 : Température moyenne du trimestre le plus froid ;
Bio_12 : Précipitation annuelle
Bio_13 : Précipitation du mois le plus humide
Bio_14 : Précipitation du mois le plus sec
Bio_15 : Saisonnalité de la précipitation (coefficient de variation)
Bio_16 : Précipitation du trimestre le plus humide
Bio_17 : Précipitation du trimestre le plus sec
Bio_18 : Précipitation du trimestre le plus chaud
Bio_19 : Précipitation du trimestre le plus froid

De l'analyse de la figure 56, il ressort que les variables environnementales individuelles telles que le BIO12 (Précipitation annuelle), le BIO4 (Saisonnalité de la température (écart-type *100) ; Bio_5 : Température maximal du mois le plus chaud), le BIO2

(Variation journalière moyenne des températures [moyenne mensuelle (max température – mini température)]), le BIO19 (Précipitation du trimestre le plus froid), le BIO16 (Précipitation du trimestre le plus humide), le BIO5 (Température maximal du mois le plus chaud), le BIO6 (Température minimale du mois le plus froid), le BIO18 (Précipitation du trimestre le plus chaud) et le BIO8 (Température moyenne du trimestre le plus humide) ont beaucoup plus contribué à la prédiction du modèle de distribution.

- ✓ **Aires de distribution actuelle et future des habitats favorables à *Daniellia oliveri***

Le tableau XVI présente la variation de la superficie des aires favorables à la présence actuelle et future de *Daniellia oliveri* et la figure 57 présente la carte de spatialisation de ces aires dans le bassin de la Sota.

Tableau XVI : Variation de la superficie des aires favorables à *Daniellia oliveri*

Modèles	Aire très favorable		Aire favorable		Aire peu favorable	
	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)	Superficie (Km^2)	Proportion (%)
Présent	7175		6700		2200	
CCCMA	11275	57,14	4175	-37,69	625	-71,59
HadCM3	2425	-66,20	4900	-26,87	8750	297,73
CSIRO	4050	-43,55	6550	-2,24	5475	148,86

De l'analyse du tableau XVI, il ressort que le modèle CCCMA indique une augmentation de 57,14 % des aires actuellement très favorables à *Daniellia oliveri* à l'horizon 2050. Par contre, on note une diminution de 38 % et de 72 % respectivement aux aires favorable et peu favorable.

Le modèle HadCM3 indique une diminution de 66,20 % et de 27 % respectivement aux aires actuellement très favorables et favorables. Les aires peu favorables connaîtront une augmentation de 297,73.

Quant au modèle CSIRO on a une diminution de 44 % et de 2 % respectivement au niveau des aires très favorables et des aires favorables. Par contre les aires peu favorables connaitront une augmentation de 149 % (figure 57).

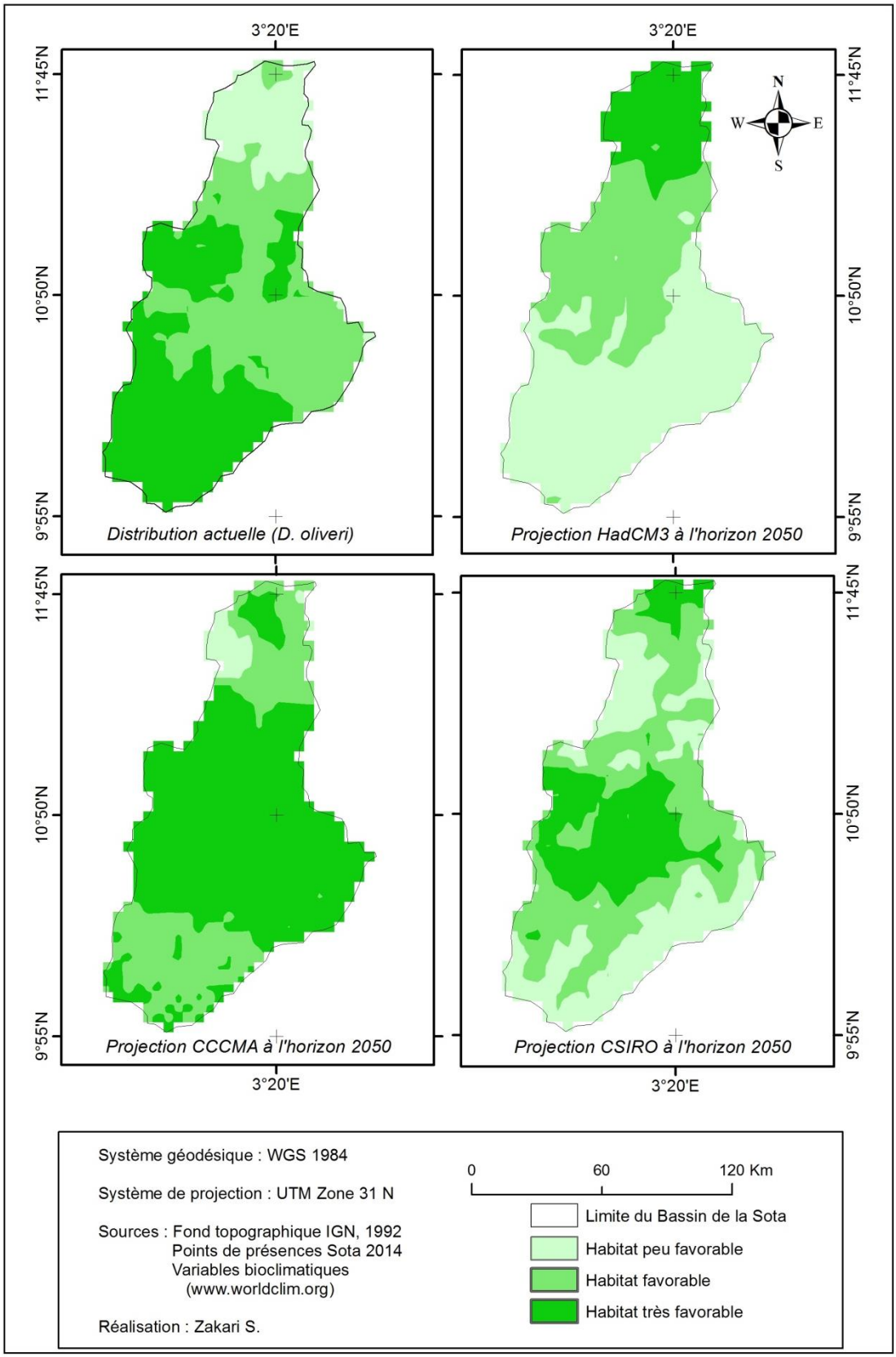


Figure 57 : Spatialisation des aires favorables à *Daniellia oliveri* dans le bassin de la Sota

5.4 Discussion

La modélisation des niches écologiques a souvent été citée comme un puissant outil pour cartographier la distribution actuelle et future des espèces et prédire l'impact des changements climatiques sur leur distribution (Van Zonneveld *et al*., 2009). Cependant, ces modèles ont aussi été très critiqués compte tenu de leurs faiblesses quant à prédire l'impact des changements climatiques sur la répartition géographique des espèces.

La distribution actuelle et future des aires de distribution des espèces étudiées a été possible grâce à la contribution de certaines variables bioclimatiques. Ces variables ont différemment contribué à la prédiction des habitats des espèces étudiées. Mais parmi ces variables, le BIO12 (précipitation annuelle) est celle ayant la plus contribué à la prédiction des habitats des espèces étudiées. Ce constat peut s'expliquer par le fait que, le gradient pluviométrique a un impact significatif sur la distribution des espèces végétales en général et en particulier sur celles étudiées.

Pour le modèle HadCM3, les projections climatiques indiquent une diminution très sensible des habitats actuellement très favorables à *Khaya senegalensis*, *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri* à l'horizon 2050. Or, dans le schéma d'une augmentation des précipitations (Modèle CCCMA et HadCM3) et en considérant le préférendum écologique de ces espèces, l'on pourrait s'attendre à une augmentation considérable de la superficie des habitats qui leurs sont actuellement très favorables ; telle n'est pas le cas. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Fandohan (2013) avec les modèles CCCMA et HadCM3 sur *Tamarindus indica*. Cette situation peut s'expliquer par le fait que, lors du calibrage du modèle, les données relatives aux caractéristiques écologiques des points de présences de ces espèces n'ont pas été prises en compte. Ainsi, la prise en compte de certaines caractéristiques écologiques telles que la température, la nature du substrat et l'altitude pourrait améliorer les résultats obtenus et par conséquent permettra de mieux les expliquer. Ce point de vue rejoint celui de Gbesso *et al.* (2013) et Saliou *et al*. (2015).

Pour les autres modèles, on note une variation aléatoire des différents habitats de ces espèces à l'horizon 2050.

En général, nos résultats démontrent que la plus part des habitats actuellement très favorables seront très négativement impactées par les changements climatiques. En

revanche, la viabilité de ces espèces n'est pour autant compromise en considérant les résultats obtenus des projections au niveau des habitats actuellement favorables et peu favorables. Ainsi, quel que soit le modèle (CCCMA, HadCM3 et CSIRO) utilisé, les changements climatiques influencent d'une manière ou d'une autre, la distribution des espèces étudiées. Le véritable problème auquel ces espèces sont actuellement confrontées reste et demeure l'exploitation forestière et l'émondage répété. Aussi, la dynamique actuelle d'occupation des terres et sa tendance évolutive indique que la quasi-totalité des habitats favorables à la présence de ces espèces d'ici 2050 sont déjà occupés par des mosaïques de cultures et jachères et des agglomérations. Ainsi, le problème de la conservation de ces espèces se pose. Par conséquent, il convient d'œuvrer à l'enrichissement des forêts classées se trouvant dans le bassin de la Sota avec les espèces fourragères ligneuses étudiées.

Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, il convient de retenir que la dynamique climatique va influencer la répartition des quatre ces espèces fourragères étudiées (*Khaya senegalensis, Afzelia africana, Pterocarpus erinaceus, Daniellia oliveri*) à l'horizon 2050.

Cette situation affectera la disponibilité en fourrage aérien et par conséquent la transhumance en saison sèche. Les responsables en charge de ce bassin pourraient prendre des dispositions qui s'imposent en vue d'une meilleure gestion des parcours naturels de transhumance.

CHAPITRE 6 : EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le chapitre 6 présente les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques dans le bassin de la Sota. Les pressions pastorales sur les parcours naturels et les sensibilités des parcours naturels à la pression sont aussi présentées.

6.1 Pression pastorale sur les parcours naturels

Les pressions pastorales sur les parcours naturels des années 2013 et 2050 ont été analysées.

6.1.1 Pression pastorale en 2013

La carte de pression pastorale en 2013 exprime en fait la charge animale potentielle exprimée en UBT/Ha et par commune (figure 58).

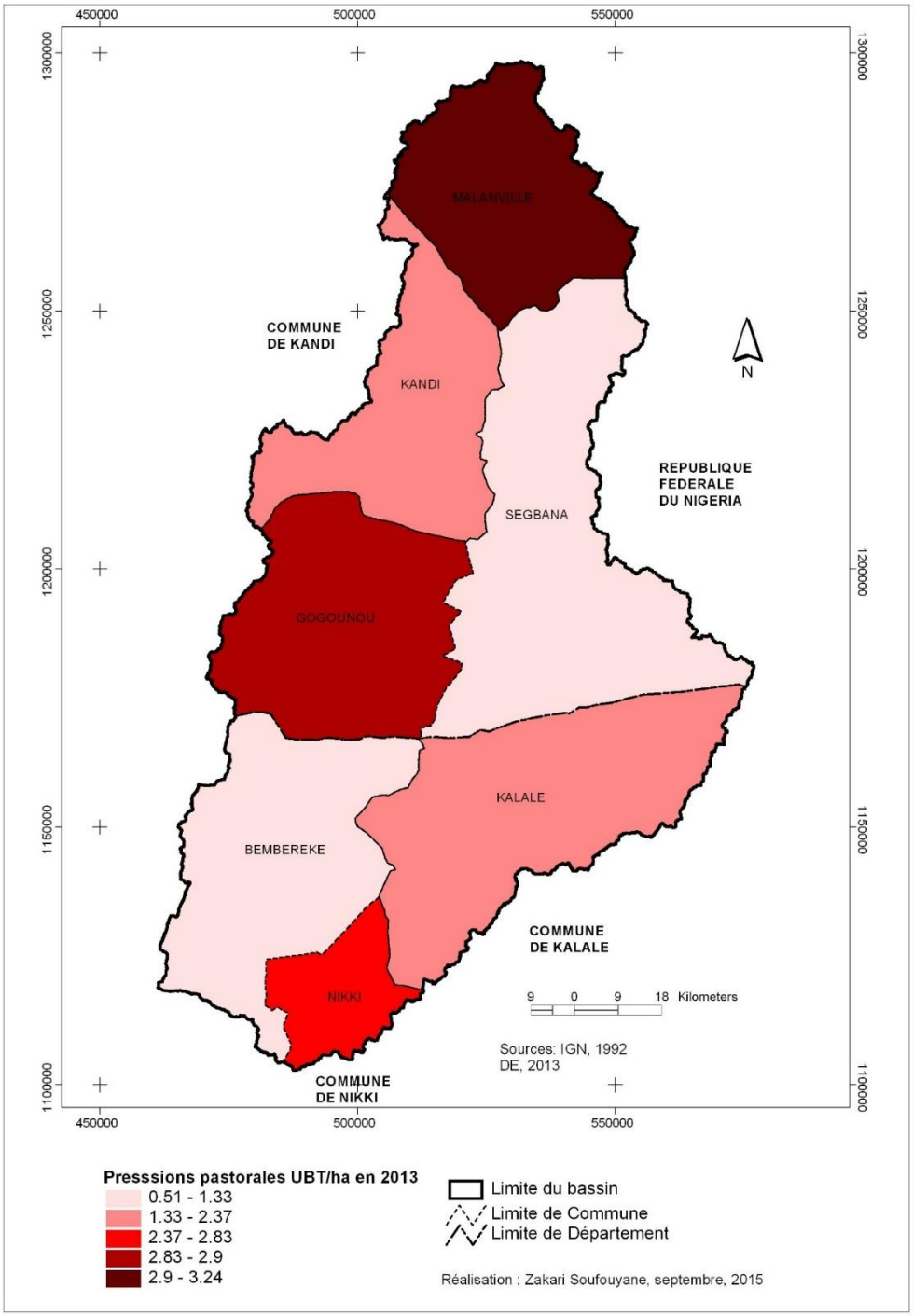


Figure 58 : Pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2013

L'examen de la figure 58 montre que les charges animales en 2013 varient entre 0,51 et 0,8 UBT/ ha. Les communes de Malanville et Gogounou présentent les charges animales les plus élevées avec respectivement 3,24 UBT/ha et 2,9 UBT/ha. Cela dénote d'une forte concentration animale et d'une disponibilité spatiale réduite pour l'alimentation des bovins.

La commune de Nikki présente par contre une charge animale moyenne (2,87 UBT/ha) par rapport à l'ensemble. Les communes de Kandi (2,03 UBT/ha) et de Kalalé (2,37 UBT/ha) montrent des charges animales faibles par rapport à l'ensemble des communes du bassin versant de la Sota.

Les très faibles charges animales apparaissent dans les communes Bembèrèkè et de Ségbana. Cette situation s'explique par le fait que ces deux communes abritent de grandes portions de domaines classés.

6.1.2 Pression pastorale en 2050

La figure 59 présente la répartition spatiale de la charge animale des communes du bassin de la Sota à l'horizon 2050.

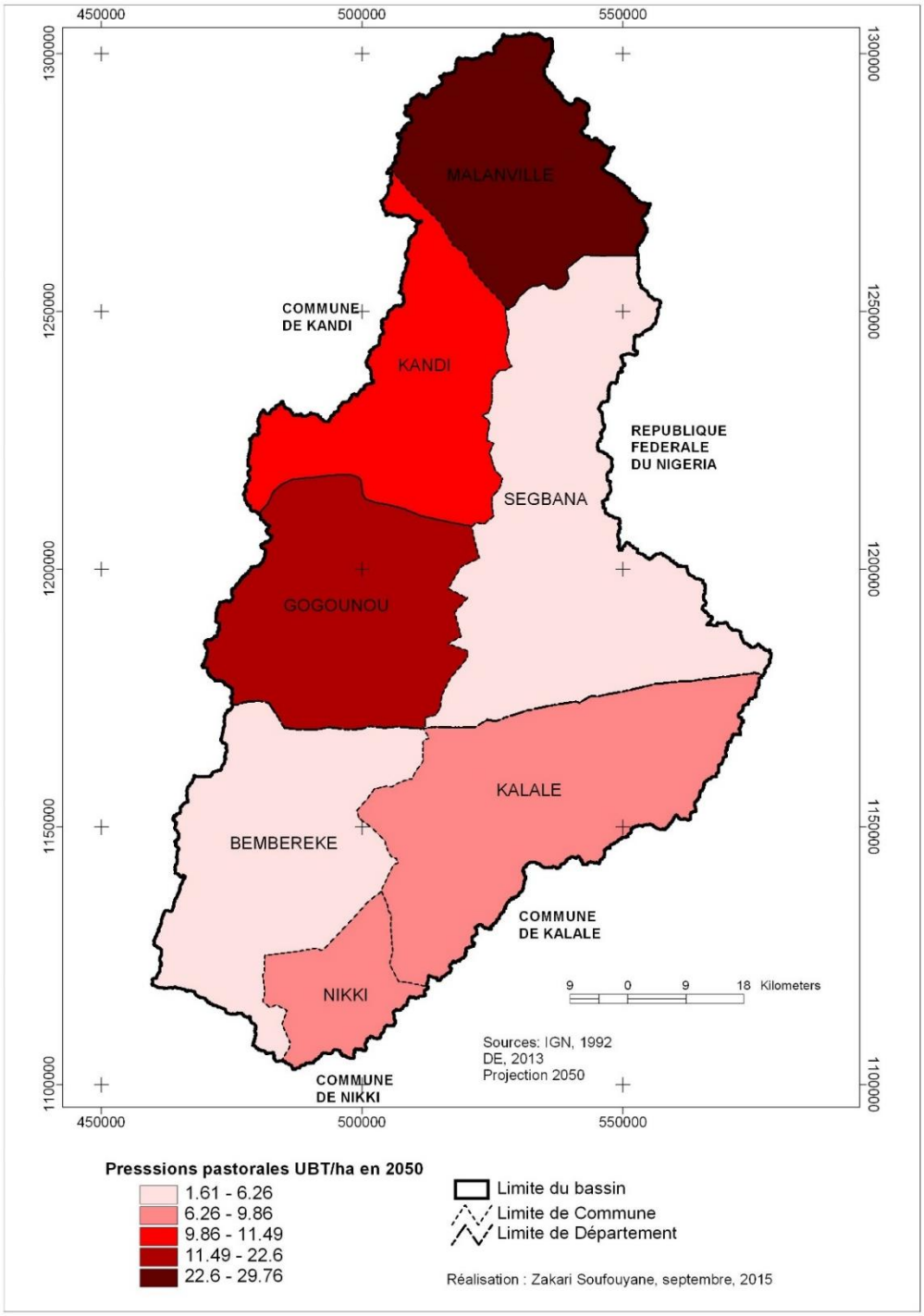


Figure 59 : Pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2050

De l'analyse de la figure 59, il ressort qu'en 2050, les charges animales varieront entre 1,6 et 29,76 UBT/ha. Les charges animales les plus importantes (22,6 – 29,76 UBT/ha) apparaîtront dans la Commune de Malanville (29,76 UBT/ha). Les Communes de Bembèrèkè (6,26 UBT/ha) et de Ségbana (1,61 UBT/ha) présenteront de faibles charges animales par rapport à l'ensemble du bassin de la Sota.

Par contre, la Commune Kandi à l'horizon 2050 connaîtra des charges animales moyennes à cause de l'anthropisation poussée des terres si les tendances actuelles de l'occupation des terres demeuraient les mêmes à l'horizon 2050.

6.2 Sensibilité des parcours naturels aux changements climatiques

Dans le processus de réalisation de la carte de sensibilité, un regroupement en trois classes des cinq classes de pression pastorale a été effectué. Ces trois classes de pression pastorale sont désormais qualifiées de faible, moyenne et élevée (figure 60).

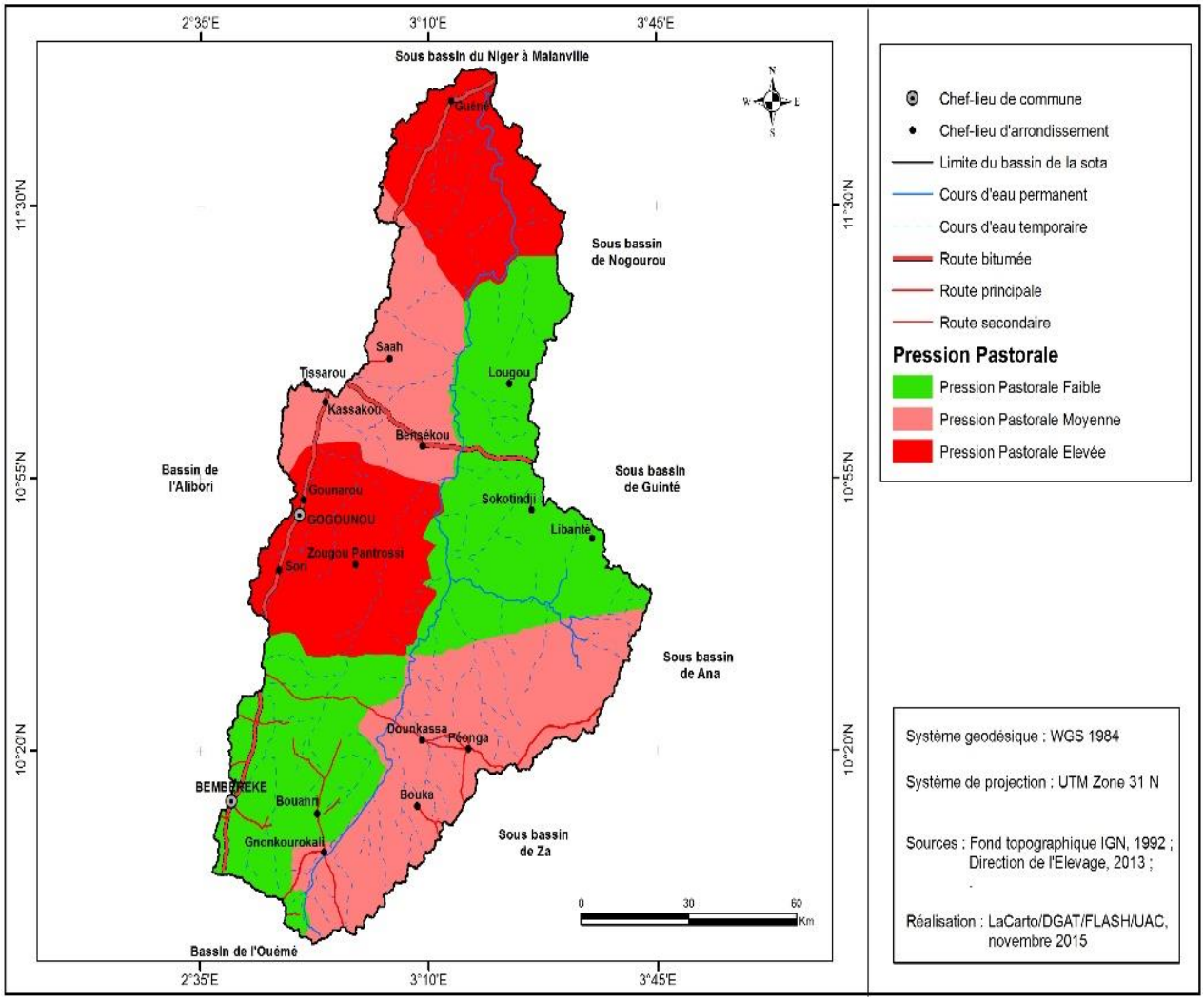


Figure 60 : Synthèse des pressions pastorales dans le bassin de la Sota en 2050

A partir de la carte de synthèse des pressions pastorales de 2050, la carte de sensibilité des parcours naturels à la pression pastorale a été réalisée en procédant à un regroupement en trois classes des unités d'occupation des terres de 2050. Ainsi, les classes de forêt galerie, forêt dense sèche et de forêt claire et savane boisée ont été

regroupées pour donner la classe de **zone peu sensible** à la pression pastorale. Les classes de savane arborée et savane arbustive, de plantation, de mosaïques de champs et jachères ont été fusionnées pour donner la classe de **zone moyennement sensible** à la pression pastorale. Les classes de surface rocheuse, de sol dénudé et d'agglomération ont été fusionnées pour donner la classe de **zone très sensible** à la pression pastorale. Cette opération a donné la carte des zones sensibles à la pression pastorale (figure 61).

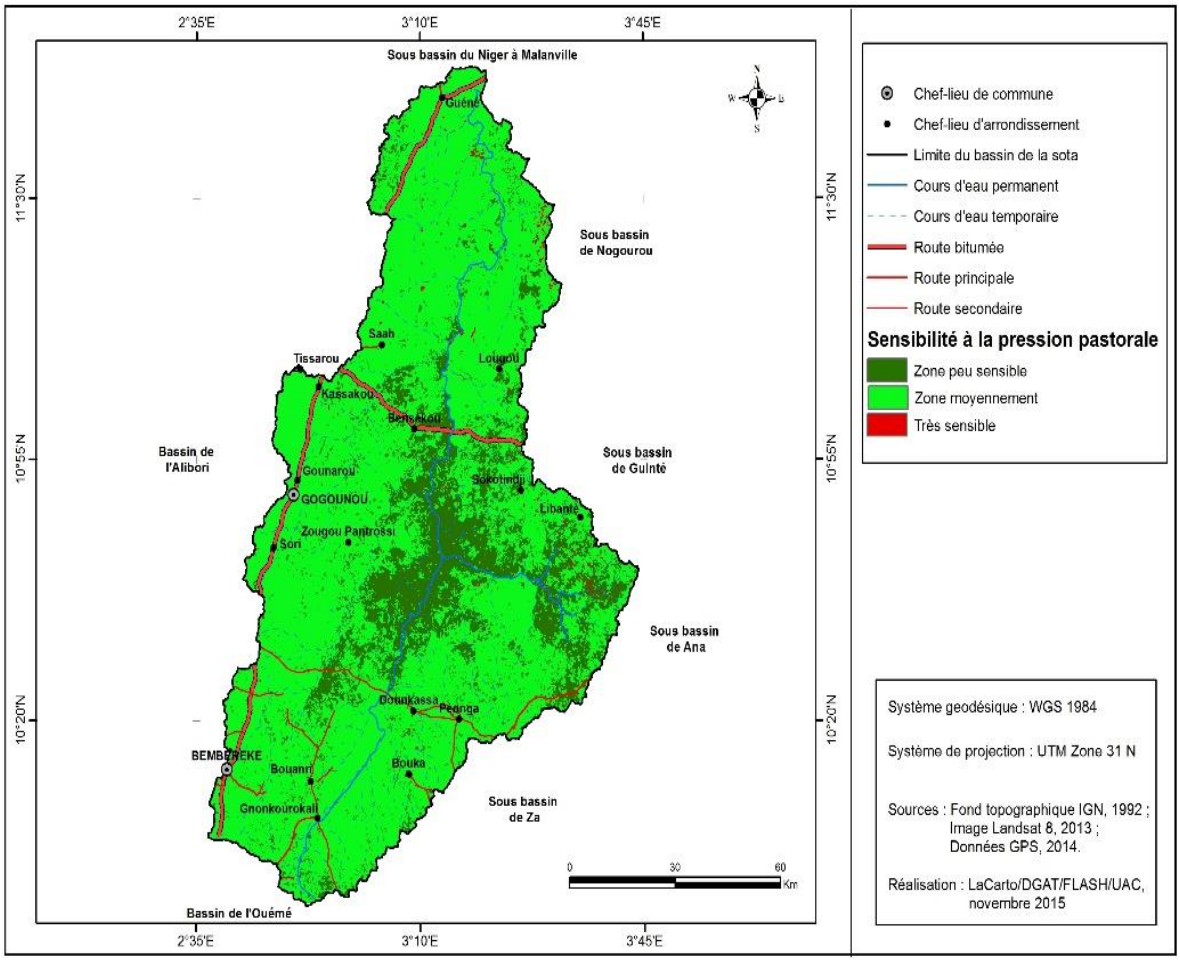


Figure 61 : Sensibilité à la pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2050

L'examen de la figure 61 révèle que plus de 80 % du bassin versant sera constitué de zones à sensibilité moyenne à la pression pastorale. Ceci s'explique par le fait que les mosaïques de champs et jachères et les savanes arborées et savanes arbustives occuperont les plus grandes superficies des terres du bassin en 2050.

6.3 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques

Pour réaliser les cartes de vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques à l'horizon 2050, les cartes de distribution potentielle des espèces

fourragères à l'horizon 2050 ont été superposées chacune avec la carte de pression pastorale et la carte de sensibilité à la pression pastorale. Ainsi pour chaque espèce fourragère, trois cartes de vulnérabilité sont réalisées suivant les trois modèles climatiques utilisés (HadCM3, CSIRO, CCCMA) pour modéliser la distribution potentielle de ces espèces en 2050.

6.3.1 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Afzelia africana*

6.3.1.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3

La carte de vulnérabilité des parcours naturels à *Afzelia africana* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050 est présentée par la figure 62.

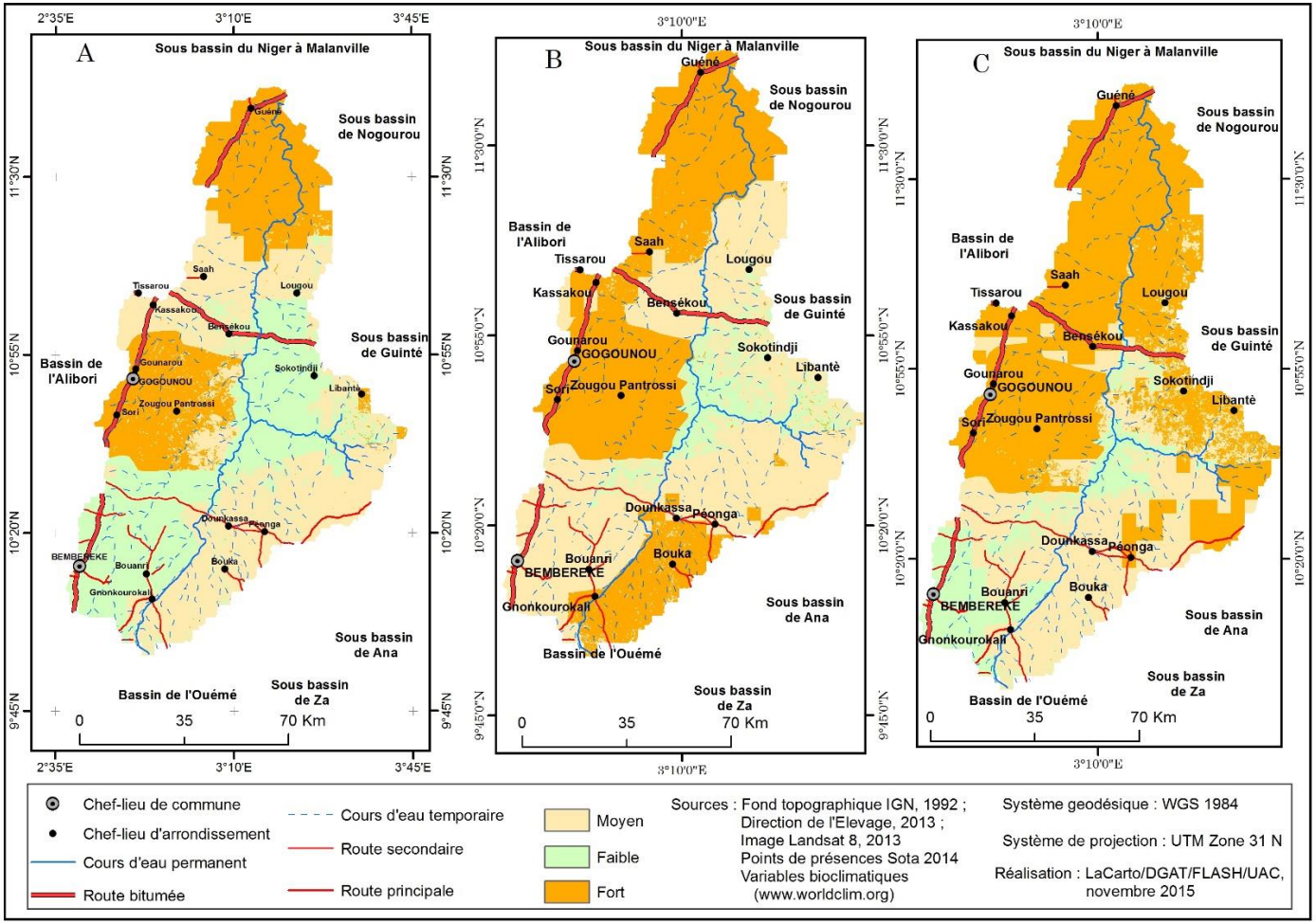


Figure 62 : Vulnérabilité des parcours naturels à *Afzelia africana* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050

L’examen de la figure 62A montre que les parcours naturels à *Afzelia africana* représentent plus de 28 % de la superficie du bassin. Les zones de niveau moyen de vulnérabilité représentent environ 39 % de la superficie du bassin. Quant à la figure 62B, elle révèle que le centre-ouest (commune de Gogounou) et le nord (commune de Malanville) du bassin de la Sota présenteront les parcours naturels à *Afzelia africana* les plus vulnérables aux changements climatiques à l’horizon 2050. Cette zone à fort niveau de vulnérabilité représentera plus de 43 % de la superficie du bassin. La zone à faible niveau de vulnérabilité couvrira environ 8 % du bassin. La zone de vulnérabilité moyenne occupera plus de 47 % du bassin. De la figure 62C, il ressort que la moitié nord du bassin présentera globalement les parcours naturels dont le niveau de vulnérabilité est le plus élevé. Ladite zone représentera à elle seule plus de 54 % de la superficie du bassin. Le centre du bassin et dans une moindre mesure le sud-est présenteront les plus faibles niveaux de vulnérabilité.

6.3.2 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Pterocarpus erinaceus*

6.3.2.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3

La vulnérabilité des parcours naturels à *Pterocarpus erinaceus* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) dans le bassin versant de la Sota à l’horizon 2050 est présentée par la figure 63.

..

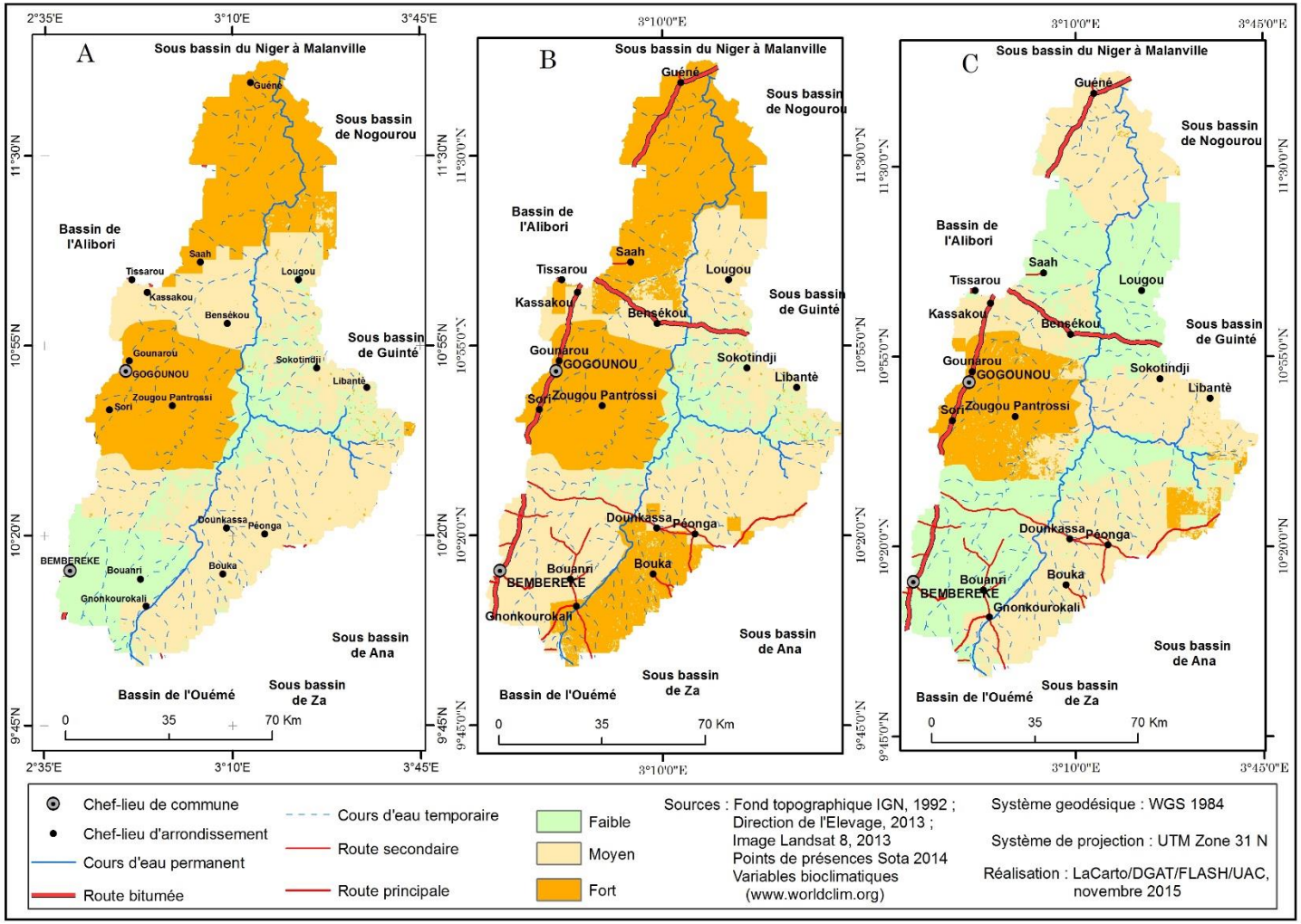


Figure 63: Vulnérabilité de *Pterocarpus erinaceus* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050

L’examen de la figure 63A révèle que l’ouest (commune de Gogounou) et le nord (commune de Malanville) du bassin de la Sota présenteront le plus fort niveau de vulnérabilité. Cette zone où le niveau de vulnérabilité est élevé représentera plus de 34 % de la superficie du bassin. Les zones de niveau moyen de vulnérabilité représenteront plus de 47 % de la superficie du bassin. Enfin, les zones où le niveau de vulnérabilité est faible localisées au sud-ouest et au centre du bassin occuperont plus de 18 % de la superficie du bassin. La figure 63B montre que le nord, le centre-ouest (commune de Gogounou) et le sud-est du bassin présenteront un niveau de vulnérabilité élevé aux changements climatiques à l’horizon 2050. L’ensemble de ces secteurs occuperont plus de 46 % du bassin. Les zones à vulnérabilité moyenne couvriront plus de 45 % du bassin. En ce qui concerne la figure 63C, elle montre que la principale zone du bassin à fort niveau de vulnérabilité sera à l’ouest c’est-à-dire autour de la commune de Gogounou. Ladite zone occupera environ 15 % de la superficie du bassin. Les zones de vulnérabilité moyenne et de vulnérabilité faible représenteront respectivement un peu plus de 46 % et 38 % de la superficie du bassin.

6.3.3 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Khaya senegalensis*

6.3.3.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3

La figure 64 présente la vulnérabilité des parcours naturels à *Khaya senegalensis* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) dans le bassin versant de la Sota à l’horizon 2050.

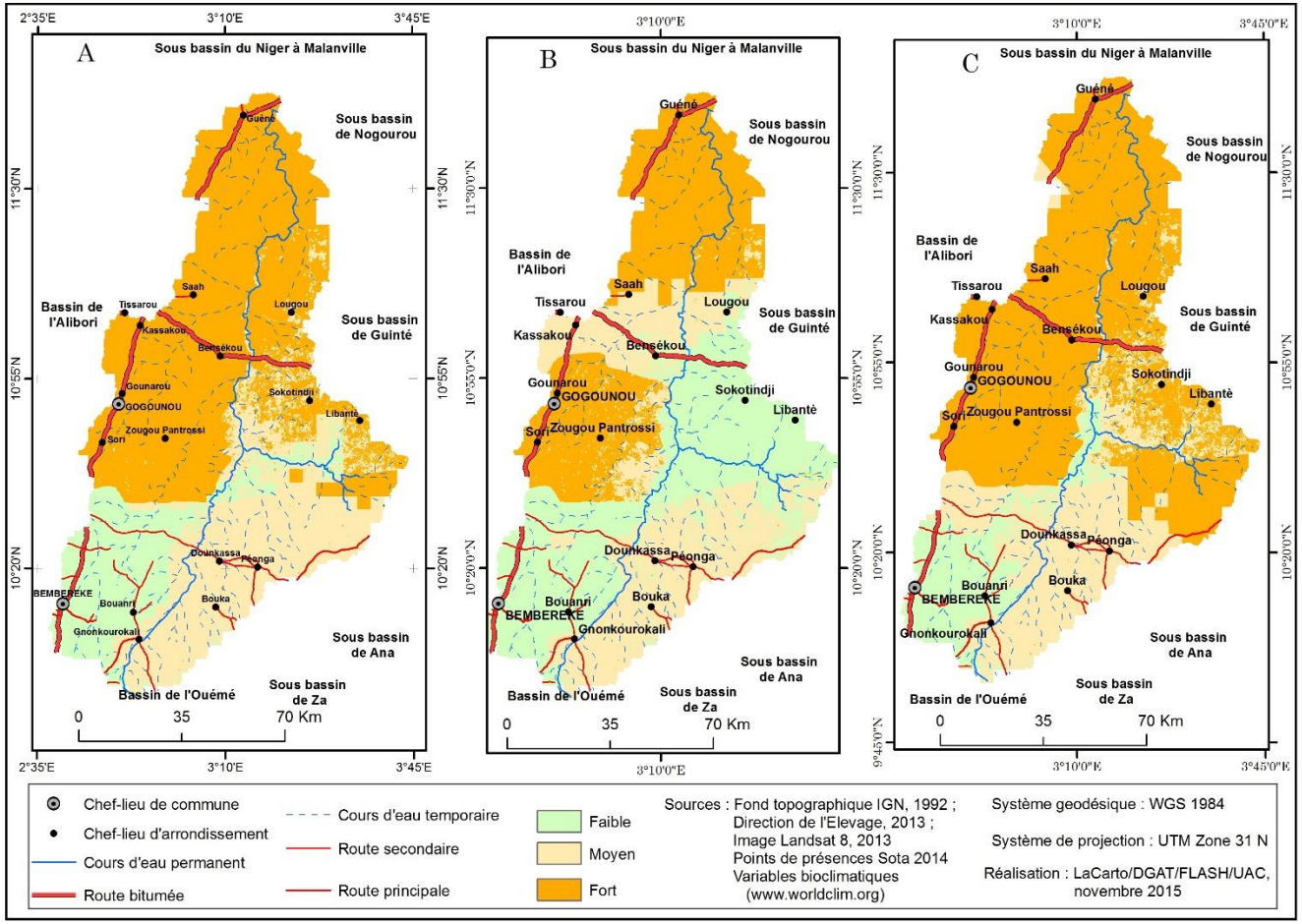


Figure 64 : vulnérabilité des parcours naturels à *Khaya senegalensis* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050

L’examen de la figure 64A révèle que la moitié nord et dans une moindre mesure l’est du bassin de la Sota présenteront un fort niveau de vulnérabilité. Ces zones occuperont à elles seules plus de 50 % du bassin. Les zones de niveau moyen de vulnérabilité représenteront plus de 30 % de la superficie du bassin. Enfin, les zones où le niveau de vulnérabilité est faible seront au sud-ouest et au centre du bassin avec plus de 16 % de la superficie du bassin. Quant à la figure 64B, il ressort que le nord et le centre-ouest du bassin présenteront un niveau de vulnérabilité élevé aux changements climatiques. L’ensemble de ces secteurs occuperont un peu plus de 32 % du bassin. Les zones à niveau moyen de vulnérabilité et celles à niveau de vulnérabilité faible occupent environ 31 % du bassin. La figure 64C montre que plus de la moitié de la superficie du bassin présentera de forte vulnérabilité. Le sud-est du bassin sera une zone de moyenne vulnérabilité. La zone à faible niveau de vulnérabilité se situera au centre et au sud-ouest avec plus de 12 % de la superficie du bassin.

6.3.4 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Daniellia oliveri*

6.3.4.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3

La figure 65 présente la vulnérabilité des parcours naturels à *Daniellia oliveri* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) dans le bassin versant de la Sota à l’horizon 2050.

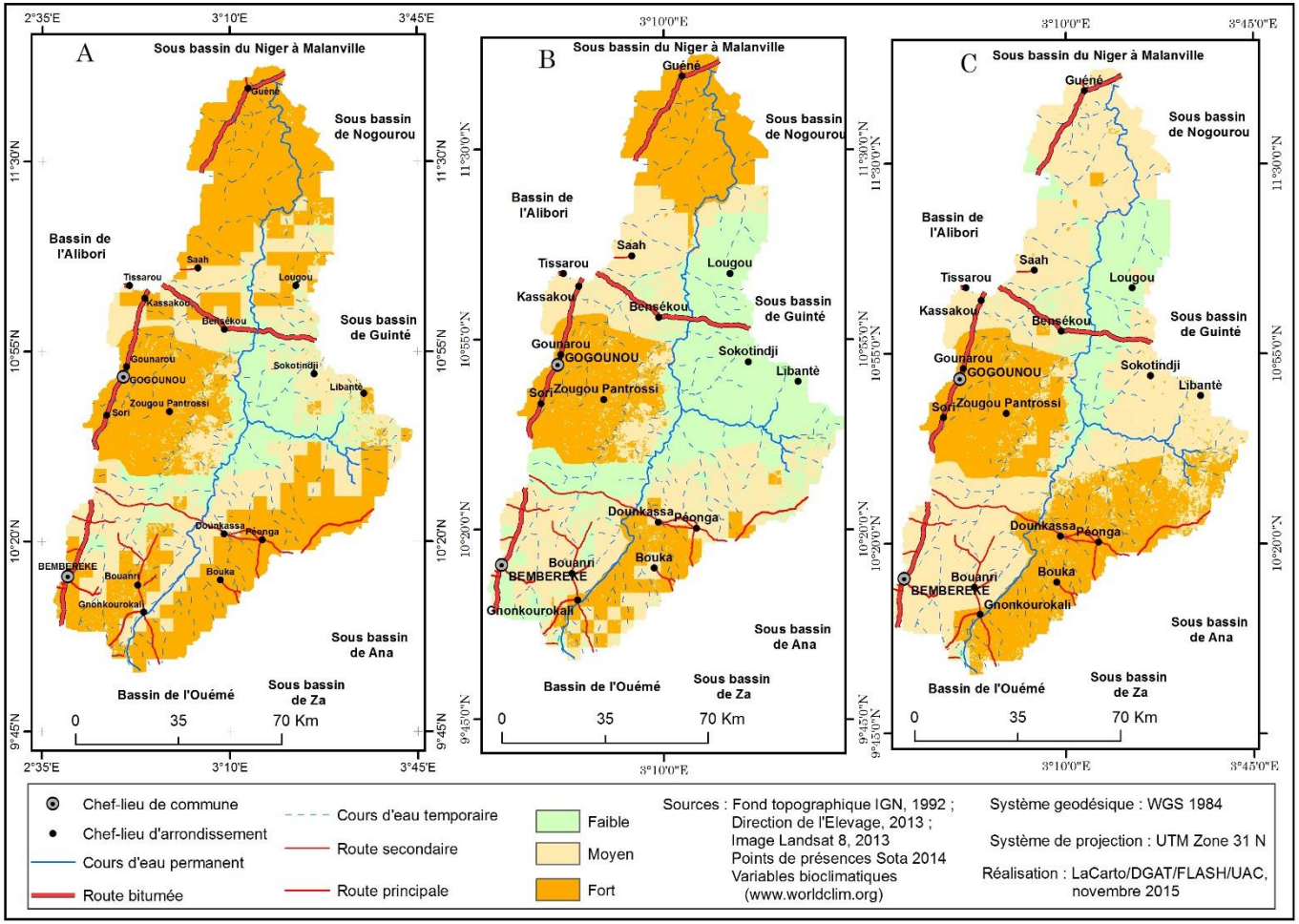


Figure 65 : Vulnérabilité des parcours naturels à *Daniellia oliveri* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050

L'examen de la figure 65A montre que le nord, le centre-ouest et le sud-est du bassin de la Sota présenteront un niveau fort de vulnérabilité aux changements climatiques à l'horizon 2050. L'ensemble de ces zones occuperont plus de 54 % de la superficie du bassin. Le centre aura probablement un faible niveau de vulnérabilité avec plus de 10 % du bassin De la figure 65B, il ressort que le nord, le centre-ouest et le sud-est du bassin présenteront une forte vulnérabilité aux changements climatiques. L'ensemble de ces secteurs occuperont un peu plus de 30 % du bassin. Les zones à niveau moyen de vulnérabilité et celles à faible niveau de vulnérabilité occuperont environ 30 % du bassin. La figure 65C montre que plus de la moitié de la superficie du bassin sera probablement vulnérable. Le sud-est du bassin présentera un niveau moyen de vulnérabilité. La zone à faible niveau de vulnérabilité se situe au centre et au sud-ouest. Cette zone représente un peu plus de 12 % de la superficie du bassin.

Une observation minutieuse de ces différentes cartes de vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques à l'horizon 2050 permet de relever quelques faits majeurs. Dans l'ensemble, on peut noter que quel que soit le modèle climatique, le nord et l'ouest du bassin affichent de forts niveaux de vulnérabilité

6.4 Discussion

Une observation minutieuse de ces différentes cartes de vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques à l'horizon 2050 permet de relever que, dans l'ensemble, quel que soit le modèle climatique, le nord et l'ouest du bassin affichent de forts niveaux de vulnérabilité. Plusieurs facteurs expliquent ce constat. En effet, cette partie du bassin connaît plusieurs situations qui apparaissent comme des contraintes importantes pour les parcours naturels en particulier et l'élevage en général. D'abord, le Nord du bassin de la Sota est la moins arrosée par les précipitations comme en témoigne la carte des champs moyens de pluie annuelle établie sur la période 1965-2010 et comme d'autres auteurs l'ont déjà montré (Vissin, 2007 ; Koumassi, 2014). Une conséquence directe de ce fait pourrait être une faible productivité des pâturages naturels car la biomasse herbacée varie dans le temps suivant les conditions pluviométriques (Sawadogo et *al*. 2005). Par exemple, pour les quatre espèces fourragères étudiées le Nord du bassin abrite généralement les aires de distribution peu favorables à ces espèces. De même, dans une étude sur la vulnérabilité des écosystèmes aux risques

hydroclimatiques, Koumassi (2014) a montré que dans le Nord du bassin de la Sota, l'élevage est la deuxième activité la plus exposée aux risques hydroclimatiques (sécheresse, inondation, etc.) alors que dans le Sud du bassin, l'élevage vient en troisième position. Par ailleurs, cette partie du bassin appartient où la surface cultivable est réduite par à la surface totale disponible à cause de la présence de plusieurs aires protégées : Parc National du W, Zone Cynégétique de la Djona, Forêt Classée de Goungoun, Forêt Classée de la Sota (De Haan, 1997). Enfin, cette partie du bassin appartient au « cotton belt » béninois c'est-à-dire la région où le coton (principale culture de rente du pays) est le plus cultivé. En somme, dans la moitié nord du bassin de la Sota connaît une réduction des aires de pâturage. La réduction des aires de pâturages provoque l'incursion des troupeaux dans les aires protégées (Convers, 2002 ; Kagoné et *al*, 2006, Tabou, 2014). Cette saturation des pâturages naturels a provoqué l'émigration progressive de certains éleveurs de la région (Djaouga, 2014). En fait si la actuelle est marquée par une forte vulnérabilité des parcours naturels du nord et de l'ouest du bassin, elle le sera davantage avec les changements climatiques (Tabou, 2014).

Quel que soit l'espèce ou le modèle climatique considéré, le centre du bassin présentera probablement un faible niveau de vulnérabilité aux changements climatiques à l'horizon 2050. Une telle situation s'explique par le fait que le centre du bassin est en grande partie occupé par la forêt classée des Trois Rivières qui abritent des classes d'occupation des terres peu sensibles à la pression pastorale et aux changements climatiques. Il s'agit en grande partie des forêts galeries, des forêts claires et savanes boisées.

Conclusion partielle

Au total la spatialisation et la modélisation de la distribution actuelle et future des quatre espèces fourragères a été en partie possible grâce à la contribution de certaines variables bioclimatiques. La variable BIO12 (précipitation annuelle) est celle ayant le plus contribué à la prédiction des habitats des espèces étudiées. Le gradient pluviométrique a un impact significatif sur la distribution des espèces végétales en général et sur celles étudiées en particulier.

CONCLUSION GENERALE

La conclusion générale comporte les points suivants : synthèse des principaux résultats et délibération sur les hypothèses, suggestions, limites de l'étude et perspectives.

Synthèse des principaux résultats et délibération sur les hypothèses

Premièrement, on peut noter dans le bassin versant de la Sota, les paramètres hydroclimatiques et l'occupation des terres ont une tendance évolutive essentiellement négative. Ce résultat confirme l'hypothèse H1 qui stipule que le bassin versant de la Sota est sujet à une double dynamique hydroclimatique et d'occupation des terres globalement négative. En effet, les résultats ont montré que la variabilité des précipitations dans le bassin de la Sota sur la période 1965-2010 s'est traduite par un déficit de l'ordre de 6,76 %. De même une rupture de moyenne a été enregistrée en 1970 sur la série des précipitations annuelles.

L'analyse des températures a mis en évidence globalement une hausse des températures minimales et températures maximales. Pour les températures minimales, la période (1965-1985) a été marquée par des valeurs faibles. Pour les températures maximales, on a une succession de phases (1965-1980 et 1991-2002) de basses températures maximales et de phases (1981-1990 et 2003-2010) de températures maximales élevées.

Les résultats ont montré que le bassin versant de la Sota a été marqué par une importante variabilité sur le plan hydrologique. Les fluctuations enregistrées sur la série hydrométrique sont très comparables à celles qu'a connues la série pluviométrique. Ainsi la rupture de stationnarité identifiée sur la série hydrométrique se situe aussi en 1970 avec un déficit d'écoulement de 33,75 %, soit environ cinq fois le déficit pluviométrique.

L'étude de la dynamique de l'occupation des terres du bassin de la Sota a révélé d'importantes mutations en cours dans cet espace. En effet, la cartographie des changements spatio-temporels de l'occupation des terres, à partir de l'analyse diachronique d'images satellitaires Landsat TM 1995, ETM+ 2006 et OLI 2013 a permis de discriminer neuf classes d'occupation des terres. Les changements identifiés de l'analyse des résultats obtenus indiquent qu'il y a une forte dégradation des formations végétales naturelles marquée par une régression des superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses sèches ; une forte anthropisation du milieu naturel

marquée par une augmentation des zones de culture, des sols dénudés et des agglomérations dans le BVS. Les programmes ‘‘Pontius Matrix22’’ et ‘‘Intensity Analysis02’’ de Aldwaik et de Pontius ont permis de mesurer les intensités des changements et les vitesses de ces changements au niveau des catégories d'occupation des terres sur les deux intervalles de temps (1995-2006 et 2006-2013). Ces vitesses ont été, dans l'ensemble, rapides. Ces variations de valeurs confirment l'état de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres entre 1995, 2006 et 2013. Les tendances majeures notées relativement à l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota peuvent se résumer en trois points :

- la dégradation des formations forestières, marquée par une réduction de superficies des forêts claires, des forêts galeries et des forêts denses ;
- la savanisation caractérisée par l'extension des savanes arborées et arbustives au détriment des forêts;
- l'augmentation importante des zones de culture et des agglomérations dans le bassin versant.

Cette dynamique de l'occupation des terres a révélé que de 1995 à 2013, les formations naturelles ont connu une régression de leurs superficies. A ce rythme, il va de soi qu'à l'horizon 2050, elles connaîtront davantage une régression des superficies de ces unités si les tendances actuelles de l'exploitation des ressources naturelles sont maintenues. Les formations végétales du BVS à l'horizon 2050 seront probablement constituées par ordre d'importance de savanes arborées et arbustives, des mosaïques de champs et jachères et des îlots de forêts claires.

Cet état de fait a pour conséquence directe une augmentation des écoulements de surface avec probablement une intensification de l'érosion des sols.

Deuxièmement, l'analyse de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution des espèces fourragères *Khaya senegalensis, Afzelia africana, Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri* dans le bassin de la Sota à l'aide des modèles climatiques CCCMA, CSIRO et HadCM3 a permis de montrer que les quatre essences ligneuses fourragères verront leur distribution spatiale modifiée par les changements climatiques à l'horizon 2050. Ce résultat confirme l'hypothèse H2 relative à l'influence des changements

climatiques sur la distribution des essences ligneuses fourragères. En effet, les résultats sortis du modèle prouvent que pour toutes les espèces que quel que soit le modèle climatique la niche écologique sera modifié à l'horizon 2050. Les simulations avec le modèle HadCM3 indiquent une diminution très sensible des habitats actuellement très favorables à *Khaya senegalensis, Afzelia africana, Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri* à l'horizon 2050. Par contre, pour les autres modèles (CCCMA, CSIRO), on note une variation aléatoire des différents habitats de ces espèces à l'horizon 2050. En somme, ces résultats démontrent que la plupart des habitats actuellement très favorables seront très négativement impactés par les changements climatiques. Toutefois le véritable problème auquel ces espèces sont actuellement confrontées reste et demeure l'exploitation forestière et l'émondage répété.

Troisièmement enfin, les résultats de l'étude ont montré que les parcours naturels des différentes parties du bassin auront des niveaux de vulnérabilité différents face aux changements climatiques à l'horizon 2050. Ainsi, les parcours naturels situés dans les Communes de Gogounou et de Malanville seront globalement plus vulnérables que ceux situés dans les autres Communes du bassin. Ces résultats révèlent également qu'une très grande partie du bassin (constituée des savanes arborées et savanes arbustives d'une part et les mosaïques de champs et jachères d'autre part) seront moyennement sensibles à la pression pastorale. En somme, les parcours naturels du bassin les plus vulnérables seront ceux situés essentiellement dans les secteurs à pressions pastorales élevée et/ou moyenne.

Une forte vulnérabilité des parcours naturels aura inévitablement des impacts négatifs sur les performances de l'élevage, sur les ménages d'agroéleveurs et sur l'économie nationale. C'est pourquoi il urge de prendre des mesures pour renforcer la résilience des parcours naturels et des populations d'agroéleveurs. C'est à cet effet que les suggestions suivantes ont été faites.

Suggestions

- mettre en place d'un système de suivi de l'état et des tendances évolutives des parcours naturels ;

- délimiter les parcours naturels afin d'éviter leur empiètement par les espaces agricoles ;
- renforcer les capacités d'adaptation des populations rurales (cultivateurs et agroéleveurs principalement) par les structures publiques et privées d'appui au développement agricole (ONG, CARDER, Projets de développement…).

Limites de l'étude

Un certain nombre de contraintes limitent la portée des résultats de la présente recherche. Entre autres, nous pouvons retenir :

- le fait d'avoir analysé les projections climatiques (scénarios climatiques) à l'horizon 2050 dans le bassin versant de la Sota par les sorties du seul modèle climatique REMO. En effet, plusieurs travaux ont montré que les projections climatiques particulièrement celles sur les précipitations en Afrique de l'Ouest comportent beaucoup d'incertitudes et aboutissement souvent à des résultats contradictoires ;
- le bilan hydrologique qui n'a pas été analysé de façon prospective pour permettre d'avoir une idée encore plus précise de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050 ;
- le fait d'avoir analysé les parcours naturels que du seul point de vue des essences ligneuses fourragères. Au Bénin en général, et dans le bassin de la Sota en particulier, même si les espèces ligneuses occupent une place importante dans l'alimentation du bétail particulièrement en saison sèche, ce sont les herbacées qui constituent la première ressource végétale des parcours naturels ;
- l'approche utilisée pour évaluer et spatialiser la vulnérabilité dans le présent travail peut être améliorée. En effet, la vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques dans le bassin de la Sota n'a été définie que comme la résultante de trois critères ou facteurs : la pression pastorale, l'occupation des terres et l'état des habitats écologiques en 2050. La pression pastorale a été calculée en prenant en compte seulement l'effectif du cheptel bovin national alors qu'il y a aussi les bovins transhumants venant des autres Communes ou des autres

pays et dont on ne maîtrise pas l'effectif. Par ailleurs, en dehors du cheptel bovin, il y a aussi les autres cheptels (ovin, caprin, etc.) qui qui se nourrissent également des ressources fourragères des parcours naturels. Une pression pastorale plus proche de la réalité doit tenir compte de tous ces cheptels. De même, l'utilisation du découpage administratif est seulement commode pour l'inventaire du cheptel mais ne règle pas le problème du continuum des parcours naturels dont les potentialités dépendent des paramètres morphopédologiques et hydriques.

Perspectives

En rapport avec les limites de la présente thèse, les prochaines études pourraient :

- analyser les scénarios climatiques du bassin de la Sota (ou d'autres bassins) à partir des sorties de plusieurs modèles climatiques régionaux afin d'avoir une diversité de vues sur les futures climatiques possibles du cadre d'étude ;
- modéliser de façon prospective les termes du bilan hydrologique pour avoir une idée plus précise de la disponilité des ressources en eau dans le bassin versant à l'aide d'un modèle hydrologique tel que SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ;
- étudier les parcours naturels en prenant en compte à la fois les herbacées et les ligneux fourragers. Pour les herbacées, la densité des peuplements pourrait être pris en compte ;
- évaluer la vulnérabilité des parcours naturels en intégrant un plus grand nombre de facteurs tels que les paramètres morphopédologiques (pente, nature du sol, etc.). On pourrait ainsi travailler à l'échelle du sous-bassin. De même d'autres facteurs comme la capacité d'adaptation des agroéleveurs, autres cheptels (ovin et caprin) ne doivent pas être négligés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achard F., Ansseau C., Beaubien J., Defourny P., Jaton A., Lemieux G., Royer A. et Thomson K., 1996. La télédétection des forêts. *In* : AUPELF *et al*. (Editor). *Précis de Télédétection*, Volume II. AUF, Québec, pp 227-265.

Adam K S., Boko M., 1993. Le Bénin. Paris, Edicef, 2ème édition, 93 p.

Afouda F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie, Université Paris IV (Sorbonne), France, 428 p.

Agli H., 1995. Recherche sur la variabilité pluviométrique dans le bassin versant du Niger au Bénin ; Mémoire de DEA. « Climat et contraintes climatiques ». DIJON 2 Tomes, Tome 1/58 p, Tome 2/273 p.

Ahouansou D. M. M., 2010. Influence de la dynamique du couvert végétal et du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de la Mékrou à l'exutoire de Kompongou à l'horizon 2025. Mémoire de Master. UAC/CIFRED, 115 p.

Aka A. A., Lubes H., Masson M., Servat E., Paturel J. E. et Kouame B., 1997. Analyse de l'évolution temporelle des écoulements en Côte d'Ivoire. Approche statistique et caractérisation des phénomènes. *In* : PHI-V, Documents Techniques en Hydrologie 1 No. 16 UNESCO, pp 47-63.

Akognongbe A. J., 2008. Caractérisation hydropluviometrique avec le modèle gr4j sur le bassin de l'Ouémé supérieur à Savè et du zou a Atchérigbé. Mémoire de maîtrise de géographie, DGAT/ FLASH/ UAC, 96 p.

Akognongbé A., Abdoulaye D., Vissin E. W. et Boko M., 2014. Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Bénin). *Afrique Science*, Vol. **10**, n° 2, pp 228-242.

Akouègninou A., 2004. Recherches botaniques et écologiques sur les forêts actuelles au Bénin. Thèse d'Etat es Sciences. Université de Cocody Abidjan, 326 p.

Aldwaik S. Z. et Pontius J. R. G., 2012. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning*, **106** : pp 103-114.

Amani A. et Lebel T., 1998. Relationships between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. Stochastic Hydrol. Hydraul. **12** : pp 141–154.

Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II, 437 p.

Arouna O., 2012. Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire. Thèse de Doctorat, EDP/FLASH, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 161 p + Annexes.

Assani A. A., 1999. Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (el niño/ la niña). Bulletin *sécheresse*, Vol. **10**, n° 4, pp 245-252.

Badjana H. M., Hounkpè K., Wala K., Batawila K., Akpagana K.et Edjamé K. S., 2014. Analyse de la variabilité temporelle et spatiale des séries climatiques du Nord du Togo entre 1960 et 2010. *European Scientific Journal*, vol. **10**, 11, pp 257-275.

Barbier N., Couteron P., Lejoly J., Deblauwe V. et Lejeune O., 2006. Self-organised vegetation patterning as finger print of climate and human impact on semiarid ecosystems. *J. Ecol*. **94** : pp 537- 47.

Bernier B., 1992. Introduction à la macroéconomie. Dunod, Paris, 217 p.

Boko G. J., 2012. Trajectoires des changements dans l'occupation du sol: déterminants et simulation. Cas du bassin versant de l'Alibori (Benin, Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH/UAC, 291 p.

Boko M., 1988. Climats et communautés rurales au Bénin : Rythmes climatiques, rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat es Lettres et sciences Humaines. CRC, URA 909 du CNRS, UNIV de Bourgogne, Dijon, 2 volumes, 601 p.

Boko M., 1992. Saisons et types de temps au Bénin : Analyse objective et prospections populaires. *L'Espace géographique*, **4**, pp 321-322

Bricquet J. P., Bamba F., Mahe G., Toure M.et Olivry J. C., 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau*, **3**, pp 321-337.

Carr L. D., Suter L. et Barberi A., 2005. Population dynamics and tropical deforestation: state of the debate and conceptual challenges. *Population and Environment*, **27** (1) : pp 89 -113

Casenave A. et Valentin C., 1988. Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom Paris,Coll. Didactiques, 202 p.

CCNUCC, 2002. Note de synthèse sur la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Bulletin de l'ANSD, vol. **3**, décembre, pp 55-66.

Cecchi P., Gourdin F., Kone S., Corbin D., Jackie E. et Casenave A., 2009. Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques. *Sécheresse*, **20** (1), pp 112-22.

CENATEL, 1995. Carte de végétation du Bénin, un instrument pour une meilleure gestion des ressources naturelles. Données de base et méthodologie, Rapport, 15 p.

Charnay B., 2010. Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne. Le cas du bassin versant du givre(Haute-Savoie). Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Savoie (ED. SISEO), 504 p.

Convers A., 2002. Etat des lieux spatialisé et quantitatif de la transhumance dans la zone périphérique d'influence du Parc National du W (Niger). Rapport de DESS. Université de Montpellier II, CIRAD-EMTV, 99 p.

Coulibaly S., 2003. L'imagerie spatiale haute résolution pour l'étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Bouna. DEA, Université de Cocody -Abidjan, Côte d'Ivoire, 60 p.

D'Aquino P., Lhoste P. et Le Massan A., 1995. Interactions entre les systèmes de production d'élevage et l'environnement : Systèmes de production mixtes agriculture pluviale et élevage en zones humide et sub-humide d'Afrique. Montpellier ; Paris : Cirad-EMYT, Ministère de la Coopération.

De Haan L., 1997. Agriculteurs et éleveurs au Nord-Bénin. Ecologie et genre de vie. Editions Karthala, Paris, 217 p.

De Souza S., 1988. Flore du Bénin (Tome 3). Noms des plantes dans les langues nationales béninoises, 424 p.

Diallo H., Bamba I., Barima Y. S. S., Visser M., Ballo A., Mama A., Vranken I., Maiga M.et Bogaert J., 2011. Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sécheresse*, Vol. **22**, pp 97-107.

Diello P., 2007. Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 368 p.

Diop A.T., Diaw O.T., Dième I., Touré I., Sy O., Dième G., 2004.- Les mares de la zone sylvopastorale du Sénégal: tendances évolutives et rôle dans les stratégies de production des populations pastorales.-Revue Elev. Med. Vét. Pays Trop. 57 (1-2) ; pp 77 – 85

Djaouga M., 2014. Dynamique des systèmes agropastoraux au Nord-est du Bénin. Thèse de Doctorat, EDP/FLASH, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 249 p + Annexes

Djego J. G. M., 2006. Phytosociologie de la végétation de sous-bois et impact écologique des plantations forestières sur la diversité floristique au sud et au centre du Bénin. Thèse de doctorat, Université d'Abomey Calavi, 388 p.

Djenontin J. A., 2010. Dynamique des stratégies et pratiques d'utilisation des parcours naturels pour l'alimentation des troupeaux bovins au Nord- Est du Bénin. Thèse de Doctorat, FSA, Université d'Abomey- Calavi, 203 p.

Doumouya I., Kamagaté B., Bamba A., Ouedraogo M., Ouattara I., Savané I., Goula Bi Tié A. et Biémi J., 2009. Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et végétation du bassin versant du Bandama en milieu intertropical (Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol*., Vol. **14**, pp 203-215.

Dubroeucq D., 1977. Carte pédologique de reconnaissance de République Populaire du Bénin à 1/200000e, Feuille de Savè ; OSRTOM, notice explicative, **66** (3), 45 p.

Eboh E.C., Oji K.O., Oji O.G., Amakom U. S., Ujah O. C., 2008. Towards the ECOWAS Common Agricultural Policy Framework: Nigeria Case Study and Regional Analysis. African Institute for Applied Economics. Enugu, Nigeria. 197 p.

Elith J., Graham C. H., Anderson R. P., Dudík M., Ferrier S., Guisan A., Hijmans R. J., Huettmann F., Leathwick R., Lehmann A., Li J., Lohmann L. G., Loiselle B. A., Manion G., Moritz C., Nakamura M., Nakazawa Y., Overton J. Mc C., Peterson A. T., Phillips J., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Schapire E., Soberon J., Williams S., Wisz M. et Zimmermann E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, **29** : pp 129-151.

Escadafal R. et Pouget M., 1986. Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *ITC Journal*, **1**, pp 19-23.

Fandohan B., Gouwakinnou G., Fonton N. H., Sinsin B. et Liu J., 2013. Impact des changements climatiques sur la répartition géographique des aires favorables à la culture

et à la conservation des fruitiers sous-utilisés : Cas du tamarinier au Bénin. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*., 2013 **17** (3), pp 450-462.

FAO, 2005. Evaluation des ressources forestières. Rapport national du Bénin. FAO, 17 p.

FAO, 2005b. Evaluation des ressources forestières mondiales. Rapport national, République Démocratique du Congo, Département des forêts, Rome, 159 p

Faure P. et Volkoff B., 1998. Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). *Catena*, **32**, pp 281-306.

Faure P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200000. Feuille d'Abomey ORSTOM, 50 p.

Fontaine B., 1985. La variabilité des précipitations en domaine sahélien et ses connexions avec la circulation atmosphérique africaine atlantique. *Cahier de Centre de Recherche de Climatologie*. N° 11, URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, pp 85-91.

Foody G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, **80** : pp. 185-201.

Franquin P., 1969. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.*, **9** : pp. 65-95.

Galle *et al*., 2004. Impact de la distribution des pluies sur les ressources en eaux superficielles du Haut Bassin de l'Ouémé (Bénin). IRD/LTHE, Université de Grenoble, France IRD/LTHE, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin IRD/HSM, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, 18 p.

Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L. and Grippa M., 2010. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). Hydrol. Earth Syst. Sci., 14: pp 309-324

Gbèsso F. H. G., Tente B. H. A., Gouwakinnou N. G., et Sinsin B. A., 2013. Influence des changements climatiques sur la distribution géographique de Chrysophyllum albidum G. Don (Sapotaceae) au Benin. *Int. J. Biol. Chem. Sci*. **7** (5) : pp 2007-2018.

GIEC [Groupe Intergouvernemental d'Etude sur le Climat], 2001. Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'Evaluation de la vulnérabilité en Afrique. *Island Press*, Washington, 53 p.

Gouet J. P., 1992. L'élaboration d'un protocole d'enquête. Proposition d'un plan-type détaillé et quelques commentaires. Paris, Institut Technique des céréales et des fourrages, 56 p.

Goula B. T. A., Savané I., Konan B., Fadika V. et Kouadio B. G., 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo,* Vol. **7**, n°1, pp. 1-12.

Gounou N'gobi A. K., 2012. Impacts du changement climatique et des activités anthropiques sur la forêt classée de la Sota et sa zone riveraine. Mémoire de Master, CIFRED/UAC, 149 p

Gounou N'gobi O., 1985. L'eau de l'abreuvement dans le développement de l'élevage au nord de la République Populaire du Benin. Thèse Méd. Vét., Dakar, Sénégal, 137 p.

Guisan A. & Zimmermann N. E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model*., **135**, pp 147-186.

Hiernaux P., Mougin E., Diarra L., Soumaguel N., Lavenu F., Tracol Y. et Diawara M., 2009c. Rangeland response to rainfall and grazing pressure over two decades: herbaceous growth pattern, production and species composition in the Gourma, Mali. *Journal of Hydrology*, **375** (1-2) : pp 114-127.

Hijmans R. J. et Graham C., 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology*, **12** : pp. 2272-2281.

Houinato M. R. B., 2001. Phytosociologie, écologie, production et capacité de charge des formations végétales pâturées dans la région des Monts Kouffé (Benin). Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Laboratoire de Systématique et Phytosociologie. ULB, Belgique, 241 p.

Houinato M., Sinsin B. et Lejoly J., 2001. Impact des feux de brousse sur la dynamique des communautés végétales dans la forêt de Bassila (Bénin). Acta botanica Gallica, **148** (3) : pp. 237-251.

Houndagba C. J., 2015. Dynamique des paysages naturels dans le centre du Benin. Thèse d'Etat, EDP/FLASH, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 349 p.

Houndagba C. J., Tenté B. A. et Guédou R., 2007. Dynamique des forêts classées dans le cours moyen de l'Ouémé (Kétou, Dogo, Ouémé-Boukou) au Bénin. In : Fournier A., Sinsin B. & Mensah G. A., 2007 (eds). Quelles aires protégées pour l'Afrique de

l'Ouest, Actes du premier séminaire sur l'aménagement et la gestion des aires protégées en Afrique de l'Ouest, Parakou, 14-19 avril 2003. IRD Editions, Paris, France, 369-380

Houndénou C., 1992. Variabilité pluviométrique et conséquences socio-économiques dans les plateaux du bas-Bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire de DEA "Climats et contraintes climatiques". URA 909 du CNRS "Climatologie Tropicale". Université de Bourgogne, 2 volumes, Dijon, 90 p.

Houndénou C., 1999. Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de géographie. UMR 5080, CNRS « climatologie de l'Espace Tropical ». Université de Bourgogne, Centre de recherche de climatologie, 341 p.

Hountondji Y., 2008. Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Thèse de Doctorat. Département des Sciences et Gestion de l'Environnement. Université de Liège, Belgique, 153 p.

Hubert P. Carbonnel J. P. et Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, **110**, pp. 349–367.

Hubert P. et Carbonnel J. P., 1993. Segmentation des séries annuelles de débits de grands Fleuves Africains. *Bull. du CIEH*, Ouagadougou, **92** : pp. 3-10.

Hubert P., Carbonnel J. P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, **95** : pp. 165-183.

IFDC, (Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement Agricole) 2006. Expériences d'apprentissage de la lutte étagée ciblée avec les Producteurs à la base dans les conditions de Banikoara : Rapport technique d'activités de la campagne 2006 - 2007.

INSAE, 1979. Recensement Général de la population et de l'Habitation (RGPH I) de 1979, Cotonou, Bénin, 56 p.

INSAE, 1994. Recensement Général de la population et de l'Habitation (RGPH II) de 1992. Cotonou, Bénin, 67 p.

INSAE, 2004. Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH III). Résultats définitifs, Cotonou, Bénin, 203 p.

INSAE, 2015. RGPH4 : que retenir des effectifs de population en 2013 ? Direction des études démographiques, Cotonou, 35 p

IPCC, 2007. Climate change: synthesis report. New York, USA: Cambridge University Press.

Issifou M. Y., 2014. Dynamique phytogéographique de la région soudanienne au Benin : secteur du district Borgou-Nord (Arrondissement de Bagou commune de Gogounou). Mémoire de maîtrise de géographie /FLASH/UAC, Bénin, 119 p

Janicot S., 1990. Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 600 p.

Kagone H., Toutain B., Dulieu D., Houinato M., Boureima A., Nocker U., 2006. Pastoralisme et aires protégées en Afrique de l'Ouest : du conflit à la gestion concertée de la transhumance transfrontalière dans la région du Parc W (Bénin, Burkina-Faso, Niger). *Bulletin of Animal Healt and Production in Africa*. **54** (1), pp 43-52.

Kouassi A. M., 2007. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.

Kouassi A. M., Kouamé K. F., Ahoussi K. E., Oularé S. et Biemi J., 2012. Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N'zi-bandama (Côte d'ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol. **20**, pp 124-146.

Kouassi A. M., Kouamé K. F., Goula B. T. A., Lasm T., Paturel J. E. et Biemi J., 2008. Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. des Sci. et Technol*., Vol. **11**, pp 207-229.

Kouassi A. M., Kouamé K. F., Yao K. B., DjéK. B., Paturel J. E. et Oularé 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. *Revue Européenne de Géographie (Cybergéo*), http://cybergeo.revues.org/index 23388.html (15 Mars 2010).

Koukoubou G. A., 2008. Contribution à l'étude ethnobotanique et caractérisation des populations de quatre espèces ligneuses (*Afzelia africana Smith ex Pers., Daniellia oliveri (Rolfe) Hutch et Dalz., Pterocarpus erinaceus Poir et Khaya senegalensis (Ders.) A. Juss.* : Cas de la réserve de Biosphère de la Pendjari et ses terroirs riverains. Thèse d'Ingénieur Agronome, FSA/UAC, 118 p.

Koumassi D. H., 2014. Risques hydroclimatiques et vulnerabilites des ecosystemes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi. Thèse de Doctorat unique, EDP/FLASH, 244 p.

Le Barbe L., Ale G., Millet B., Texier H. et Borel Y., 1993. Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, 540 p.

Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H. et Borel Y., 1993. Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, 540 p.

LECREDE, 1995. Récession pluviométrique et mutations socio-économiques dans le haut-Borgou. Travaux et documents du laboratoire de climatologie, UNB/FLASH/DGAT, **1**, 79 p.

Lee A. F. S. et Heghinian S. M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables. A Bayesian approach. Technometrics, vol. **19**, n°4, pp. 503-506.

Leroux M., 1970. La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale. Thèse de Doctorat de 3è cycle, Dakar, FLASH, 282 p.

Leroux M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Dijon 4T, 427 p.

Leroux M., 1988. Variabilité des précipitations en Afrique Occidentale. Les composantes aérologiques du problème. Veille Climatique Satellitaire, **22**, pp. 26-45.

Lessard L., 1964. Hydrogéologie du bassin sédimentaire de Kandi. Cotonou, ONU/PNUD, 84 p.

LGGI (Leica Geosystems Geospatial Imaging), 2005. Fundamentals of ERDAS IMAGINE. LGGI, Georgia, USA, 240 p.

Lienou G., 2007. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun. Thèse de Doctorat de l'université Yaoundé I, 486 p.

Lombry T., 2000. Météorologie élementaire. http://www.astrosurf.org/lombry meteo-tropicale. Aegeus.

Lubès-Niel H., Masson J. M., Paturel J. E. et Servat E., 1998. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, **3**, pp. 383-408.

Lubès-Niel H., Masson J. M., Servat E., Paturel J. E., Kouame B. et Boyer J. F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etudes bibliographiques. Programme ICCARE, Rapport n°3, ORSTOM, Montpellier, France.

Mahé G. et Olivry J. C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, Vol. **6**, n° 1, pp. 109-117.

Mahe G. et Olivry J-C., 1995. Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *In* : *Sécheresse*, Paris, pp. 109 - 117.

Mahé G., 2009. Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa. *Hydrol. Sci. J*., **54**, pp. 704-712.

Mahe G., Dray A., Paturel J. E., Cres A., Kone F., Manga M., Cres F. N., Djoukam J., Maïga A. H., Ouedraogo M., Conway D. et Servat E., 2002. Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambé river in Burkina in FRIEND (2002) Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice. Van L. et Demuth S. (éds). *IAHS Publ*. n° **274**. Cape Town-South Africa, pp. 69-76.

Mahé G., L'höte Y., Olivry J. C. et Wotling G., 1999. Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa - 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. **46**, n° 2, pp. 211-226.

Mahé G., Olivry J. C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F. et Servat E., 2000. Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, Sciences de la Terre et des planètes, **330**, pp. 689-692.

Maman M. I., Mahamane A., Mbow C., Saadou M. et Bachmann Y., 2011. Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le Parc national du W du Niger (Afrique de l'Ouest). *Sécheresse*, **22**, pp.108-16.

Manière R., Bassisty E., Celles J. C., et Melzi S., 1993. Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : Exemple d'Ain Oussera (Algérie), Cah. *Orstom, sér. Pédol*, **28** (1) : pp 67-80.

MEHU, 2002. Stratégie Nationale et Plan d'Action pour la Conservation de la Diversité Biologique au Bénin, 144 p.

MEPN, 2008. Programme d'Action national d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (PANA BENIN).

Miehe S., Kluge J., von Wehrden H. and Retzer V., 2010. Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal. Journal of Applied Ecology, 47: pp 692-700.

Nicholson S. E., 2001. The nature of rainfall variability over Africa on time-scales of decades to Millenia. Global and Planetary Change, **26**, pp. 137–158.

Nicholson S., 2000. Land surface processes and Sahel climate, *Rev. Geophys*, **38** (1), pp. 117- 139.

Noufe D., 2011. Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire ; Thèse de Doctorat de géographie ; Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne U.F.R. de géographie UMR 8586 PRODIG, 375 p.

Olivry J. C., 2002. Synthèse des connaissances hydrologiques et potentielles en ressources en eau du fleuve Niger. International report World Bank-Niger Basin Authority, 156 p.

Onibon P., 1999. Définition d'une politique et d'un programme d'actions pour la gestion de la transhumance « durable », dans le cadre de la lutte contre la désertification au Bénin. Mission, MEHU, Cotonou, Bénin, 65 p.

Ouattara T., Dubois J-M., et Gwyn Q. H. J., 2006. Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multisources et de l'indice de végétation TSAVI. *Télédétection*, **6** (4**) :** pp 291-304.

Ozenda P., 1982. Les végétaux dans la biosphère. Doin, Paris, 431 p.

Paturel J. E., Servat E., Kouame B., Lubes H., Masson J. M., Boyer J. F., Travaglio M. et Marieu M., 1997. Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée, Approche régionale intégrée. Documents Techniques en Hydrologie, vol. **16**, UNESCO, Paris, pp. 1-31.

Perreault L., 2000. Analyse bayésienne rétrospective d'une rupture dans les séquences de variables aléatoires hydrologiques. Thèse en cotutelle ENGREF/GRESE et Univ. Quebec/INRS-Eau, 200 p.

Phillips S. J., Anderson R. P. et Schapire R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190** : pp. 231-259.

Phillips S. J., Anderson R. P. et Schapire R. E., 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecol. Model*., **190**, pp 231-259.

Pontius Jr. R. G., 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. **66**, No 8, pp. 1011–1016.

Pontius R. G. et Schneider L.C., 2001. Land-cover change model validation by an ROC prediction. *In* Smarandache F., Dezert J. : Advances and Applications of DSmT for information Fusion. From Evidence to Plausible and Paradoxical Reasoning for Land, 62 p.

Quattrochi D. A. et Goodchild M. F., 1997. Scale in Remote Sensing and GIS. Lewis Publishers, 406 p.

Ramarohetra J., 2010. Augmentation paradoxale de la surface en eau des mares sahéliennes au cours de la sécheresse multi-décennale récente. Etude des changements de surface. Mém. Master 2 OASC, Université Paul Sabatier, Toulouse, 42 p.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique, FAO 70, Rome; 320 p.

Ruphin K., 2010. Analyse des déterminants socioculturels des perceptions et stratégies d'adaptation des agro-éleveurs face aux changements climatiques : cas de Yé, Bounou, Wembatenga et Amsia au Burkina Faso. Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural, SER-UPB, Burkina-Faso, 61 p.

Saliou A. R. A., Oumorou M. et Sinsin B. A., 2015. Modélisation des niches écologiques des ligneux fourragers en condition de variabilité bioclimatique dans le moyen-Bénin (Afrique de l'Ouest). *Revue d'Ecologie (Terre et Vie),* Vol. **70** (4), 12 p.

Sawadogo L., Tiveau D., Nygard R., 2005. Influence of selective tree cutting, livestock and prescribed fire on herbaceous biomass in savannah woodlands of Burkina-Faso. West Africa Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. **105** pp. 335-345.

Schwartz D., 1995. Méthode statistique à l'usage des médecins et des biologistes. 4è édition, éditions médicinales, Flammarion, Paris, 214 p.

Servat E., Paturel J. E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Boyer J. M., Lubès-Niel H., Fritsch J. M., Masson J. M. et Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan' 98 Conference held at Abidjan, Côte d'lvoire, November 1998. *IAHS Publ*. No. **252**, pp. 323-337.

Servat E., Paturel J. E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Hoyer J. F., Lubès-Niel H., Fritsch J. M., Masson J. M. et Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *In*. Water Resources Variability in Africa during the XX th century, IAHS Publications, n° 252, pp. 323-337.

Servat E., Paturel J. E., Lubes-Niel H., Kouame B. et Travaglio M., 1997. De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Sciences de la terre et des planètes*, Vol. **325**, pp. 679-682.

Servat E., Paturel J. E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J. M., Travaglio M.et Marieu B., 1999. « De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol. **12**, N° 2, pp. 363-387.

Sighomnou D., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun. Perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 290 p.

Sinsin B., 2000. Caractéristiques floristiques et productivité des jachères soudaniennes sur plateau du Bénin septentrional. In : Floret C, Pontanier R, eels. La iachère en Afrique tropicale. Montrouge France: John libbey Eurotext.

Soro G., Ahoussi E. K., Kouadio E. K., Soro T. D., Oulare S., Saley M. B., Soro N. et Biemi J., 2014. Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *Afrique Science*, **10** (3), pp 146 – 160.

Soro T. D., Kouakou B. D., KouassiE. A., Soro G., Kouassi A. M., Kouadio K. E., Yéi M. S. O. et Soro N., 2013. Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire), *Vertigo*, Vol. **13**, n°3, http://vertigo.revues.org/14347, (15 Mars 2015).

Sultan B., Janicot S., 2004. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intra saisonnières. 1ère partie : Analyse diagnostique de la mise en place de la mousson et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse*, **15** (4), pp 321-330.

Swets J. A., 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**, pp 1285-1293.

Toko Mouhamadou I., 2015. Facteurs déterminants de la fragmentation des écosystèmes forestiers : cas des îlots de forêts denses sèches de la forêt classée des Monts-Kouffé et de sa périphérie au Bénin. Thèse de doctorat en Géographie, UAC, 231 p + annexes.

Totin V. S. H., 2010. Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : stratégies de gestion durable. Thèse de Doctorat. Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace, 283 p.

Van Zonneveld M., Koskela J., Vinceti B. et Jarvis A., 2009. Impact of climate change on the distribution of tropical pines in Southeast Asia. *Unasylva,* 231/232 : pp 24-29.

Viennot M., 1978. Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire Du Bénin A 1/200.000, Feuille de Bembèrèkè. ORSTOM, Paris, France, 45 p.

Vissin E. W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du basin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 267 p.

Vissin E. W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 267 p + Annexes.

Vissin E. W., Amoussou E., Houssou C. S., 2007. Variabilité de la pluviométrie et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Climat et Développement, vol **3**, LECREDE, Université d'Abomey-Calavi, pp. 22-32.

Vissin E. W., Houndénou C., Perard J., 2007. Sécheresse pluviométrique et tarissement dans le bassin de la Mékrou (Bénin, Afrique de l'Ouest). Actes du XXe Colloque de l'AIC, Carthage-Tunis, pp 568-573.

Vissin E. W., Houssou C. S., Houndénou C., 2006. Péjoration pluviométrique et vulnérabilité des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. « Sciences de l'Environnement », LaRBE, pp. 75-92, Lomé.

Vissin E. W., Houssou C. S., 2004. Étude de la variabilité du bilan hydrologique dans le bassin de la Sota (Bénin, Afrique de l'Ouest), Actes des 2èmes Journées Scientifiques des Universités nationales du Bénin, Abomey-Calavi, pp. 51-61.

Vissin E. W., Houssou C. S., Boko M. et Houndénou C., 2004. Impact des fluctuations pluviométriques sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest) », Actes du XVIIe colloque de l'AIC, Caen (France), **17**, pp. 385-388.

Vissin E. W., Boko M., Pérard J. et Houndénou C., 2003. Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin,

Afrique de l'Ouest). Publications de l'Association Internationale de Climatologie, BESANSSON, vol.**15**, pp 368-376.

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

Vissin E. W., 1998. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Nationale du Bénin, 80 p.

Vodounnon A. J., 2010. Impacts des systèmes culturaux sur la biodiversité, les états de surface et les écoulements dans le bassin-versant de la Sota. Mémoire de DESS, CIFRED/UAC, 91 p.

Vodounnou J., 2008. Contribution à l'étude de la caractérisation hydropluviométrique du bassin de l'Ouémé avec le modèle GR2M. Mémoire de maîtrise de Géographie. Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 83 p.

Williams J. W., Jackson S. T. et Kutsbach J. E., 2007. Projected distribution of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proc. Natl. Acad. Sci.* U.S.A., **104**, 5738-5742.

Yabi I., 2008. Etude de l'Agroforesterie à base de l'anacardier et des contraintes climatiques liées à son développement dans le centre du Bénin. Thèse de Doctorat nouveau régime, EDP/FLASH, 234 p.

Yehouénou T. D. R.; Akouéhou G. S. et Ganglo J. C., 2012. Caractéristiques structurales et écologiques des populations de *Antiaris toxicaria* (Pers.) Lesch et de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn dans les forêts reliques du Sud-Benin, ISSN 1991-8631, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6** (6) : pp 5056-5067.

Zakari S., Tente B. A. H, Yabi I., Toko Imorou I. et N'Bessa B. 2015. Changements spatio-temporels de l'occupation des terres et dynamique des écoulements de surface dans le bassin versant de la Sota (Nord Benin). *Actes du 5ème Colloque International. Sciences, cultures et Technologies pour le développement*, Université d'Abomey-Calavi (Sous-Presse).

Zakari S., Tente B. A. H, Yabi I., Toko Imorou I., Karimou S., Afouda F. et N'Bessa B., 2015. Influence des changements climatiques sur la distribution de K. senegalensis et de A. africana des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota au Bénin. *Actes du 2ème Colloque Recherche Scientifique aux services du développement local*, Université de Parakou (Sous-Presse).

Zakari S., Tenté B. A. H., Toko Imorou I., Yabi I., Afouda F. et N'Béssa B., 2015. Variabilité hydropluviométrique et dynamique de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri au Bénin (Afrique de l'Ouest). *International Journal of Innovation and Applied Studies,* Vol **3**, n°2, pp. 235-250

Zakari S., Tente B. A. H., Yabi I., Toko Imorou I. et N'Bessa B., 2015. Evolution hydroclimatique, perceptions et d'adaptation des agroéleveurs dans l'extrême Nord du Bénin (Afrique de l'Ouest). *Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015*, pp 399-405.

Zakari S., Tente B. A. H., Yabi I., Toko Imorou I., Tabou T., Afouda F. et N'Bessa B., 2015. Vulnérabilité des troupeaux transhumants aux mutations climatiques : analyse des perceptions et adaptations locales dans le bassin de la Sota à Malanville. *Afrique Science,* **11** (3) : pp 211-228, 211 ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des articles scientifiques

Zakari S., Tente B. A. H, Yabi I., Toko Imorou I. et N'Bessa B. 2015. Changements spatio-temporels de l'occupation des terres et dynamique des écoulements de surface dans le bassin versant de la Sota (Nord Benin). *Actes du 5ème Colloque International. Sciences, cultures et Technologies pour le développement*, Université d'Abomey-Calavi (Sous-Presse).

Zakari S., Tente B. A. H, Yabi I., Toko Imorou I., Karimou S., Afouda F. et N'Bessa B., 2015. Influence des changements climatiques sur la distribution de *K. senegalensis* et de *A. africana* des parcours naturels de transhumance du bassin de la Sota au Bénin. *Actes du 2ème Colloque Recherche Scientifique aux services du développement local*, Université de Parakou (Sous-Presse).

Zakari S., Tente B. A. H., Toko Imorou I. et Yabi I., 2015. Variabilité hydropluviométrique et dynamique de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri au Bénin (Afrique de l'Ouest). *International Journal of Innovation and Applied Studies,* **13** (2) : pp 235-250.

Zakari S., Tente B. A. H., Yabi I., Toko Imorou I. et N'Bessa B., 2015. Evolution hydroclimatique, perceptions et d'adaptation des agroéleveurs dans l'extrême Nord du Bénin (Afrique de l'Ouest). *Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015*, pp 399-405.

Zakari S., Tente B. A. H., Yabi I., Toko Imorou I., Tabou T., Afouda F. et N'Bessa B., 2015. Vulnérabilité des troupeaux transhumants aux mutations climatiques : analyse des perceptions et adaptations locales dans le bassin de la Sota à Malanville. *Afrique Science,* **11** (3) : 211-228, 211 ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info.

Annexe 2 : Effectif du cheptel bovin des communes du bassin de la Sota

1	BEMBEREKE	KALALE	KANDI	MALANVILLE	NIKKI	SEGBANA	GOGOUNOU
2000	99.399	121.488	121.488	55.222	99.399	57.431	88.355
2001	102.480	125.254	125.254	56.933	102.480	59.211	91.094
2002	105.759	129.262	129.262	58.754	105.759	61.105	94.009
2003	108.403	132.494	132.494	60.223	108.403	62.633	96.359
2004	111.100	135.800	135.800	61.800	111.100	64.200	98.800
2005	113.900	139.200	139.200	63.800	113.900	65.800	101.300
2006	116.861	142.819	142.819	65.331	116.861	67.511	103.934
2007	110.200	150.200	137.300	58.900	108.600	64.600	120.100
2008	113.100	154.100	140.900	60.400	111.400	66.300	123.200
2009	116.041	158.107	144.563	61.970	114.296	68.024	126.403
2010	119058	162218	148322	63581	117268	69793	129689
2011	122154	166435	152178	65234	120317	71607	133061
2012	125330	170763	156135	66930	123445	73469	136521
2013	128588	175203	160194	68671	126654	75379	140071

Sources : DE, 2013

Annexe 3 : Evaluation de la disponibilité spatiale de la pression bovine sur les terres dans le bassin de la Sota en 2013

Communes	BEMBEREKE	GOGOUNOU	KALALÉ	KANDI	MALANVILLE	NIKKI	SEGBANA
Sup	205600	198700	237900	165700	160600	59000	294300
AG	648	322	835	410	606	80	616
MCJ	43899	59570	53100	34305	33117	11294	40222
SN	23384	24521	7953	22238	9253	2848	9274
AR	36	50	93	211	0	19	631
EspAntro13	67966	84464	61981	57164	42977	14241	50742
Forêt	40725	65970	101986	29613	96434	0	96764
EspNa13	108691	150435	163967	86777	139410	14241	147507
Sup_dis2013	**96909**	**48265**	**73933**	**78923**	**21190**	**44759**	**146793**
Chep13	128588	140071	175203	160194	68671	126654	75379
Pressions/UBT	1,33	2,90	2,37	2,03	3,24	2,83	0,51

Légende : *Légende : AR : Affleurement Rocheux ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; SN : Sol Nu ; AG : Agglomération ; EspNa13 : Espace naturel en 2013 ; Sup.dis2013 : Superficie disponible en 2013 ; chep13 : cheptel bovin en 2013.*

Annexe 4 : Evaluation de la disponibilité spatiale et de la pression sur les terres pastorales dans le bassin de la Sota en 2050

Communes	BEMBEREKE	GOGOUNOU	KALALÉ	KANDI	MALANVILLE	NIKKI	SEGBANA
Sup	205600	198700	237900	165700	160600	59000	294300
AG	612	307	828	396	615	79	603
MCJ	48174	72512	66577	65740	39693	13051	48058
SN	62980	43845	18461	33687	17893	11289	269556
SS	0	48	84	232	1	18	597
EspAntro50	111766	116711	85950	100055	58202	24438	318813
Forêt	40725	65970	101986	29613	96434	0	96764
EspNa13	152491	182682	187936	129668	154636	24438	415578
Sup_dis2050	53109	16018	49964	36032	5964	34562	121278
Chep2050	332394	362077	452891	414094	177511	327394	194851
Pressions/UBT	6,26	22,60	9,06	11,49	29,76	9,47	1,61

Légende : *Légende : AR : Affleurement Rocheux ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; SN : Sol Nu ; AG : Agglomération ; EspNa50 : Espace naturel en 2050 . Sup.dis2050 : Superficie disponible en 2050 ; chep50 : cheptel bovin en 2050.*

Annexe 5 : Clés d'interprétation des photographies aériennes panchromatiques noir et blanc

CS	Forme	Ton de Gris	Texture	Structure	Objet Identifié
T	Irrégulière	Moyennement gris	Peu granulé et peu lisse	Granulée et lisse	Savane arborée
U	Irrégulière	Gris assez sombre	Très peu lisse et assez granulée	Granulée et lisse	Savane boisée ou forêt claire
M	Régulière	Assez claire	Lisse à peu lisse	Homogène	Jachère ou champ nu
K	Irrégulière	Gris clair	Très peu granulée	Homogène	Savane arbustive
N	Régulière	Gris sombre	Granulée et alignée en ordre	Très homogène	Plantation
V	Irrégulière	Très claire	Granulée et groupée	Assez homogène	Agglomération
O	Sinueuse	Gris sombre	Floconnée	Assez homogène	Galerie forestière
Q	Sinueuse	Très claire	Lisse	Homogène	s: route ou piste
L	Sinueuse	Gris sombre	Lisse	Homogène	Cours d'eau
R	Irrégulière	Très claire	Lisse	Homogène	Sol nu ou affleurement

Annexe 6 : Clé d'interprétation des images satellites

Code	Forme	Tonalité	Identification
1	Irrégulière	Rouge vif	Forêt claire
2	Sinueuse	Rouge vif	Galerie forestière
3	Irrégulière	Rouge modéré	Savane boisée
4	Irrégulière	Rouge pâle	Savane arborée
5	Irrégulière	Vert parcouru de fines traces rouges	savane arbustive
6	Effilée	Bleu	Cours d'eau

Annexe 7 : Centres de recherche visités

Centres de documentation Visités	***Nature** des documents*	**Types d'information recueillies**
Bibliothèque Centrale de l'Université d'Abomey-Calavi	Livres, thèses, mémoires, ouvrages généraux, ouvrages spécifiques et articles.	Informations générales, techniques de rédaction des mémoires
Bibliothèque du Collège Polytechnique Universitaire (CPU)	Livres, thèses, mémoires, articles.	Approche méthodologique
Bibliothèque centre de documentation (BiDoc/ FSA)	Ouvrages généraux, ouvrages spécialisés, thèses, mémoires, rapports de mission	Informations spécifiques sur l'agro-pastoralisme
Centre de documentation de la FLASH	Livres, thèses, mémoires, rapports et articles.	Approche méthodologique, techniques de rédaction des mémoires
Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale	Livres, thèses, mémoires, rapports et articles.	Approche méthodologique et bases de données sur les espèces végétales
Laboratoire de Climatologie	Livres, thèses, mémoires, statistiques climatiques	Approches méthodologiques et données climatiques
Laboratoire d'Ecologie Appliquée de la FSA	Ouvrages spécialisés, thèses, mémoires, rapports de mission	Approche méthodologique et bases de données sur les espèces végétales
Office Béninois de la Recherche Géologique et Minière (OBRGM)	Cartes géologiques	Informations sur les formations géologiques
L'Institut Géographique National (IGN-Bénin)	Cartes topographiques et photographies aériennes	Données de base sur la cartographie du secteur d'étude
Le Centre National de Télédétection et de surveillance du couvert forestier (CENATEL)	Cartes de végétation et photographies aériennes	Information sur l'occupation du sol et les formations végétales du secteur d'étude.
Laboratoire d'Etude des Sols et Sciences Environnementales (LESSE)	Cartes pédologiques, cartes géologiques	Information sur les formations pédologiques
L'Agence Béninoise pour L'environnement (ABE)	Livres, rapport d'études sur les impacts environnementaux	Notes sur les impacts écologiques
L'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aériennes (ASECNA) en Afrique	Données climatiques	Informations sur les statistiques climatiques du secteur d'étude
Bureau des Archives à Parakou	Rapports annuels d'exercice, rapports de mission, plans cadastraux	Données sur l'histoire de Parakou
Union Communale de Coton (Parakou)	Rapports annuels de campagnes agricoles	Informations générales sur les productions du secteur
Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE)	Données statistiques	Données démographiques
SERHAU-SEM	Livres, thèses, mémoires, rapport et articles, plan de ville	Informations générales du milieu d'étude, Plan d'urbanisme
CeRPA Parakou	Rapports annuels de campagnes agricoles	Informations générales sur les productions du secteur

Annexe 8: Caractéristiques des stations météorologiques utilisées

Stations	**Latitude Nord**	**Longitude Est**	**Nature de la station**
Alfakoara	11°27’	3°04’	Pluviométrique
Banikoara	11°18’	2°26’	Pluviométrique
Bembèrèkè	10°12’	2°40’	Pluviométrique
Ina	9° 58’	2°44’	Climatique
Kalalé	10°18’	3°23’	Pluviométrique
Kandi	11°08’	2°56’	Synoptique
Malanville	11°52’	1°39’	Pluviométrique
Nikki	9°56’	3°12’	Pluviométrique
Parakou	9°21	2°36	Synoptique
Ségbana	10°56’	3°42’	Climatique

Source : Le Barbé et *al.*,1993

Annexe 9 : fiche de recueil de données sur les pratiques agricoles

Fiche d’entretien N°……..

Date----------

Commune---------- COM----------

Arrondissement---------- ARR----------

Village---------- VILL----------

Nom Enquêteur----------

1- Identification

Nom Enquêté----------

a) Sexe---------- 0 Masculin ; 1 FémininSEXE----------

b) Age----------AGE----------

c) Situation matrimoniale: ----------SITMAT----------

0= célibataire, 1= marié, 2= divorcé, 3= veuf (veuve)

d) Niveau scolaire : ----------NIVSCOL----------

0= jamais été à l’école, 1= primaire, 2= collège, 3= BAC

e) Niveau d’alphabétisation en langue locale----------ALPHA----------

1= Oui, 0= Non

f) Nombre d’années de résidence dans le village----------ARESID----------

g) Activité principale----------ACTIVP----------

1=l’agriculture, 2=l’élevage; 3= commerce ; 4= artisan ; 5=ouvrier ; 6=autres à préciser

2- Données sur parcelles exploitées

a) Superficie exploitée----------SUPEX----------

0= pas de terre ou moins de trois parcelles, 1= terre exploitable de moins de 1ha, 2= terre exploitable entre 1 et 2 ha, 3= terre exploitable de plus de 2 ha

b) Modes accès à la terre----------MACCES----------

0= héritage, 1= achat, 2= métayage, 3= emprunt, 4= gage, 5= louer, 6= autre à préciser

c) Nature du terrain----------NTERAIN----------

0= plateau, 1= versant, 2= bas-fond, 3= vertisols

d) Activité menée sur la parcelle----------ACTMEN----------

0= Jachère naturelle, 1= Jachère améliorée, 2= Agriculture, 3= Elevage

e) Quelles sont vos principales cultures PRINCULT----------

3- Travail du sol et type de culture

a) Matériels utilisés pour l'agriculture----------MATUTIL----------

0= petits matériels agricoles, 1= traction animale, 2= agriculture motorisée

b) Type de défrichement----------TDFRICH----------

0= défrichement sans incinération, 1= défrichement avec incinération

c) Type de labour----------TLABOUR----------

0= labour à plat, 1= labour en planche, 2= labour en billons, 3= labour en buttes

d) Mode de labour---------- MLABOUR---------

0= labour manuel, 1= labour mécanisé

Travail du sol / Type de culture	**a)** Matériels utilisés pour l'agriculture (MATUTIL)	**b)** Type de défrichement (TDFRICH)	**c)** Type de labour (TLABOUR)	**d)** Mode de labour (MLABOUR)
Maïs				
Manioc				
Igname				
Patate				
Niébé				
Riz				
Soja				
Arachide				
Coton				
Autre				

4- Système de culture

Cultures	Superficie emblavée	Origine et type d'engrais	Quantité et nombre d'application	Dates					Gestion des résidus
				Semis	Sarclages			Récoltes	
					1er	2ème	3ème		

Gestion technique des spéculations végétales

a) pratique de l'assolement----------PASSOL----------

0= Non, 1= Oui

b) pratique de la rotation----------PROTA----------

0= Non, 1= Oui

c) association des cultures----------ASSOC----------

0= Non, 1= Oui

Association de culture

	Igname	Maïs	Coton	Arachide	Niébé	Patate	Soja	Riz	Sorgho	Autre
Igname										
Maïs										
Coton										
Manioc										
Arachide										
Niébé										
Patate										
Soja										
Riz										
Sorgho										
Autre										

Comment faites-vous l'association

Association	Maïs + niébé	Sorgho + niébé	Manioc + sorgho	Maïs + Manioc	Arachide + maïs	Sorgho + arachide	…… …….	…….. …….	..... …….	…… ……
Culture Principal										
Culture associée										
Pourquoi										
Effets sur le sol										

Comment										

Rotation de culture

Cultures Année	Champ 1	Champ 2	Champ 3	…… ……	…… ……	Jachère
1						
2						
3						
4						
……..						

5- La fertilisation

a) type d'engrais----------TENGR----------

0= Engrais organique, 1= Engrais chimique

b) mode d'épandage----------MEPAND----

0= épandage à la volée, 1= localisation en bande, 2= application au pied de la plante, 3= autre forme d'application.

Cultures	Superficie emblavée	Nom de l'engrais	Mode d'application	Quantité et nombre d'application	Dates				
					Nombre d'application				
					1er	2ème	3ème	……	…….

6- Lutte contre les ravageurs

a) lutte chimique à base de produits naturels----------LTCPN--------

0= Nom, 1= Oui

b) lutte chimique à base de substances de synthèse----------LTCSS--------

0= Nom, 1= Oui

Cultures	Superficie emblavée	Nom du pesticide	Origine du pesticide	Quantité et nombre d'application	Dates				
					Nombre d'application				
					1er	2ème	3ème	……	…….

7- Evolution des superficies emblavées dans le temps

Année	Champ 1	Champ 2	Champ 3	…… ……	…… ……	Jachère
2008						
2009						
2010						
2011						
2012						
2013						

c) Avez des questions spécifiques à nous poser ?

……

……

……

8- Perception des aléas climatiques

1- Quels sont les signes annonciateurs de la saison des pluies dans votre localité ?

……

……

Qu'est-ce qui caractérise la saison pluvieuse dans votre localité (Duré et manifestation) ?

……

……

2- Est-ce que la saison des pluies commence plus tôt maintenant ou plus tard qu'il y-a 30 ou 40ans ?

……

……

3- Quels sont les mois de l'année

les plus pluvieux ?	les moins pluvieux ?

4- Pleut-il aujourd'hui comme autrefois ?

Oui pourquoi ?	Non pourquoi?

5- Selon vous à quoi sont dus ces changements ?

……

……...

6- Ces changements ont-ils des inconvénients sur vos activités et comment ?

Pêche	
Agriculture	
Approvisionnement en eau	
Pisciculture	
Elevage	
Navigation (transport)	

Autre …….	
Autre…….	

7- Quels sont les différents techniques d'adaptation à ces changements utilisez-vous dans votre localité ? ……
……9

- Pourriez-vous nous dire les causes de ces changements ?

……

9- Sources d'eau et difficultés rencontrées

1- Quels sont les cours d'eau qui drainent votre localité ? (Situer-les)

Nom du cours d'eau	Localisation dans le village (coordonnées GPS)	Sa source	Lieu de rejet

2- Quelles sont les fonctions de ces cours d'eau ?

Pêche	
Agriculture	
Approvisionnement en eau	
Pisciculture	
Elevage	
Navigation (transport)	
Sacrifice	
Lessive	
Vaisselle	
Bain	

3- Quels sont les plans et point d'eau de la localité ? (situez-les dans la localité)

Nom du plan ou point d'eau	Localisation dans le village (coordonnées GPS)	Retenue d'eau ou marre	Usages

4- Comment se comportent les cours, plans d'eau et points d'eau ?

Nom du cours, plan ou point d'eau	En saison pluvieuse	En saison sèche	Période des hautes eaux	Périodes des basses eaux	Mois de tarissement

5- Grâce à quoi reconnaissez-vous l'arrivée des hautes eaux ? et des basses eaux ?

……

……

6- Quels sont selon vous les signes de la nature qui annoncent le tarissement ou l'assèchement des cours, plans et point d'eau ?

……

……

7- Quelles sont les causes du tarissement ?

……

……

8- Que faites vous quand les eaux tarissent ?

……

……

9- Quels sont les cours et plans d'eau sacrés dans votre localité ? (les situer en précisant leur source)

Nom du cours d'eau	Localisation dans le village (coordonnées GPS)	Sa source	Particularité par rapport aux autres	Tarissent-ils ?	
				Oui (pourquoi ?)	Non (pourquoi ?)

10- Perception des crises hydroclimatiques

1- Quels sont les signes naturels annonciateurs des inondations et de sécheresses ?

……

……

2- Quelles sont les années d'inondation extraordinaire que vous avez connu depuis 1950 ? quelles explications vous leur donnez ? quelle est leur fréquence ?

……

……

3- Quelles sont les années de tarissement sévère que vous avez connu depuis 1950 ? Quelles explications vous leur donnez ? quelle est leur fréquence ?

……

……

4- Quels sont dans votre localité les mois d'inondation ? comment le identifiez-vous ?

……

……

5- Quels sont dans votre localité les mois de sécheresse ? comment les identifiez-vous ?

……

Quelles perceptions avez-vous des inondations et de l'assèchement des cours et plan d'eau ?

……

Quels sont les impacts de l'inondation et de la sécheresse sur vos activités ?

Pêche	Inondation	Sécheresse
Agriculture		
Approvisionnement en eau		
Pisciculture		
Elevage		
Navigation (transport)		
Sacrifice		

6- Quels sont les impacts de ces inondations ?

Destruction des maisons	Pertes de terres et de cultures	Dégradation de la qualité des eaux	Autres

7- Quelles mesures prenez-vous contre l'inondation dans votre village ?

Déménagement	
Remblai de la cour	
Surélévation de la maison	
Canalisation vers la rue	
Autre …….	
Autre……	

8- Existent-ils des bafonds dans votre localité ? Quels usages en sont faits ?

……

Dans quelles conditions provoque-t-on la pluie dans votre localité ?

……

Que faites-vous en cas de manque d'eau dans les cours et plans d'eau ?

……

Quelles sont les activités alternatives que vous menez ?

En période d'inondation ?	En période de sécheresse ?

10- Techniques de gestion traditionnelle des cours, plans et points d'eau

1- Quels aménagements fait-on sur les cours et plans de votre village ?

……

……

Êtes-vous satisfaits de ces types d'aménagement ?

……

Existe-t-il dans votre localité des comités de gestion des plans et points d'eau ?

Oui, pourquoi et comment ?	Non, pourquoi ?

2- Pratiquez-vous l'agriculture irriguée dans votre localité ?

……

……

10- Utilisation des terres

1- Quelles terres exploitez-vous pour la production agricole (basfond….) ?

……

……

Combien d'hectares de nouvelles terres défrichez-vous par an ou à quelle fréquence ?

……

2- Quelle superficie mettez-vous en jachère par an et pourquoi ?

……

……

3- Assistez-vous à des phénomènes de dégradation et d'érosion dans vos champs ? et à quelle période de l'année ?

……

……

4- Depuis quand avez-vous constatez cette dégradation suivie de la perte des terres ?

……

……

5- Quels sont pour vous les signes indicateurs de la dégradation ?

……

……

6- Quelles sont les conséquences de cette dégradation des terres sur vos activités et les ressources en eau ?

……

……

7- Quelles solutions avez-vous trouvé face à ces difficultés ?

……

……

8- Quelles sont, selon vous les causes de ces pertes de terre ?

……

……

11- Le couvert végétal

1- Avez-vous des formations végétales naturelles dans votre localité ?

……

……

2- Quelles sont selon vous leurs superficies ?

……

……

3- Sont-elles demeurées constantes ces dernières années ?

……

……

4- Y a-t-il eu des projets de plantation d'arbres ces dix ou vingt dernières années dans votre localité ?

……

……

5- Quels sont les inconvénients de cette modification sur vos activités et sur les ressources en eau de votre localité ?

……

……

6- Quelles solutions avez-vous trouvé face à ces problèmes ?

……

7- Quelles sont, selon vous les causes de la variation des superficies des formations végétales ?

……

……

……

12- Question à l'endroit des éleveurs (grand bétail)

1- Evolution du cheptel

Année	Effectifs du cheptel	Fréquence d'abreuvement	Superficie de l'aire de pâture
2008			
2009			
2010			
2011			
2012			
2013			

2- Quelles sont les modes d'alimentation du bétail ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

3- Comment gérez-vous l'effectif du cheptel ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

12- Question à l'endroit des pêcheurs

1- Quels sont vos méthodes et moyens de pêche ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

2- Comment les prises évoluent ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

3- Quelles sont les espèces de poissons que vous pêchez ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

4- Dans quelles circonstances faites vous la pêche?

……

5- Les prises sont-elles importantes ?

En temps d'inondation ?	En temps de sécheresse ?

Merci pour avoir accepté de consacrer votre temps à répondre à nos questions

Annexe 8 : questions à l'endroit des éleveurs/ transhumants

Date----------
Commune---------- COM----------
Arrondissement---------- ARR----------
Village---------- VILL----------
Nom Enquêteur----------
A- Généralités sur l'éleveur et le terroir
Nom Enquêté----------
1) Sexe---------- 0 Masculin ; 1 Féminin SEXE----------
2) Age---------- AGE----------
3) Situation matrimoniale: ---------- SITMAT----------

0= célibataire, 1= marié, 2= divorcé, 3= veuf (veuve)
4) Nombre d'années de résidence dans le campement---------- ARESID----------
5- Nombre total de ruminants ---------- NTRUM----------
0= bovins…….. 1= ovins……. ..2= caprins…….
6- Quel est le point d'eau principal du campement ?---------- PEAUPRINCIP-------
0= Marigot, 1=barrage, 3=puits ordinaire, 4= puits équipé,
5=forage, 6= autre (à préciser)
7- Comment appréciez-vous l'accès au point d'eau ? ---------- ACPEAU----------
0=difficile, 1=plus ou moins difficile, 2=facile
8- Achetez-vous ici de l'eau pour l'abreuvement des animaux ? ------- ACHEABR----------
0= Oui, 1= Non
9- Si oui combien par jour en moyenne ? ------- COUTEAUJ----------
0= Oui, 1= Non
10- Quelles sont les espèces végétales les plus appétées par les animaux
en saison pluvieuse : Herbacées :---------- ----------
---------- ----------

Ligneuses :---------- ----------
---------- ----------

11- Quelles sont les espèces végétales les plus appétées par les animaux
en saison sèche : Herbacées :---------- ----------
---------- ----------

Ligneuses :---------- ----------
---------- ----------

13- Ordre de préférence des espèces les plus appétées ---------- OPE----------
Herbacées :---------- ----------

---------- ----------

Ligneuses :----------

14- Espèces menacées de disparition parmi les espèces appétées ---------- EMEA---------
Herbacées :----------

Ligneuses :----------

15- Evaluation du degré de rareté des espèces appétées---------- EDRE----------
0=très rare, 1=rare, 2= moyenne
16- Causes de la rareté ---------- CAR----------
0=défrichement agricole, 1= coupe anarchique de bois, 2=surpâturage,
3= autre (à préciser)
17- Conscience du danger de la disparition des espèces végétales CDDEL----------
sur l'élevage/transhumance 0=oui, 1=non
18-Si oui quelles sont les stratégies mises en place pour faire face à la disparition de ces espèces
---------- ----------
---------- ----------

19- Quel espace est utilisé pour le pâturage des animaux ? EP----------
0= espace privé dédié au pâturage, 1= espace communautaire loué
pour le pâturage, 2=espace communautaire réservé au pâturage,
3= champs récoltés, 4= Forêt classée, 6= autre (à préciser)
20- Y-a-t-il des transhumants non résidents installés non loin du campement ? **TRSHNRESID**------
0=oui, 1=non
21- Si oui d'où viennent-ils ? --------- **ORIGTRSHNRESID**----------
22- Où vont-ils ? **DESTRSHNRESID**----------

B- Pratiques de la transhumance

23- Quand est-ce que vous pratiquez la grande transhumance ?------- **PRATRANSH**----------
0=chaque année, 1= Seulement quand je manque de pâturage
et d'eau, 2=seulement quand je peux (quand j'ai les moyens),
3= quand l'état nutritionnel et de santé du troupeau l'exige,
4= quand c'est mieux ailleurs qu'ici pour le troupeau,
5= quand c'est mieux ailleurs qu'ici pour les personnes,
6= autre (à préciser) ----------

24- Qu'est-ce qui vous a poussé à votre dernière grande transhumance ? ---------- **CDTRANSH**
0=habitude, 1= manque d'eau, 2= manque d'eau et de pâturage,
3= mauvais état nutritionnel et de santé du troupeau,
4= c'est mieux ailleurs pour le troupeau,
5= c'est mieux ailleurs pour les personnes,
6= autre (à préciser) ----------

25- Qu'est-ce qui aurait pu vous empêcher d'effectuer
cette transhumance ? ---------- CETRANSH----------
0=disponibilité d'eau et de pâturage,
1= manque de moyens,
2= maladie du troupeau,
3= bon état nutritionnel du troupeau,
4= maladie de personne,
5= problèmes sur les parcours de transhumance,
6= autre (à préciser) ----------

26- Quelle est votre destination de transhumance ?---------- DESTRANSH----------

27- Qu'est-ce qui vous attire à cette destination ? ---------- **ATDES**----------
0=disponibilité d'eau et pâturage, 1= meilleurs pâturages et point
d'eau qu'ici, 2=marché, 3= route, 4= sécurité,
5= autre (à préciser) ----------

28- Comment se fait la prospection de la destination avant le départ ? ---- **PROSPDEST**---------
0=pas de prospection, 1= à pied, 2=personne extérieure, 3=par voiture,
4= par téléphone portable, 5= au fur et à mesure de la progression
6= autre (à préciser) ----------

29- Quel est l'itinéraire global de votre dernière grande transhumance ? (zones de départ, de transit et de destination)

30- Avez-vous connaissance de couloirs sur le parcours ?---------- **CCP**----------
0=oui, 1=non Pourquoi ?----------

31- Quel espace est utilisé par le troupeau au niveau de la zone de destination ? ----- **EPDEST**-----
0= espace privé dédié au pâturage, 1= espace communautaire loué
pour le pâturage, 2=espace communautaire réservé au pâturage,
3= champs récoltés, 4= Forêt classée, 6= autre (à préciser)

32- Une fois arrivé à la zone de destination avez-vous d'échange **ECHINFO**----------
d'information avec le campement de départ ?
0= famille, 1=commerce, 3=santé, 4= environnement,
5=pas de contact, 6= autre (à préciser)

32-Comment se fait l'établissement de ce contact ? ---------- **MCONTACT**----------
0= visite familiale, 1= personne extérieure, 2=téléphone portable, 3=autre (à préciser)

33- Quel est le point d'eau principal dans la zone
de destination ? **PEAUPRINCIPDEST**-------
0= Marigot, 1=barrage, 3=puits ordinaire, 4= puits ordinaire,
5=puits équipé, 6= autre (à préciser)

34- Comment appréciez-vous l'accès au point d'eau ?---------- **ACPEAUDEST**----------
0=difficile, 1=plus ou moins difficile, 2=facile

35- Achetez-vous ici de l'eau pour l'abreuvement des animaux ? ------- **ACHEABRDEST**----------
0= Oui, 1= Non

40- Si oui combien par jour en moyenne ? ------- **COUTEAUJDEST**--------
0= Oui, 1= Non

41- Problèmes rencontrés au niveau de la zone de destination **PROBDEST**----------

---
42- A quel moment décidez-vous de retourner au campement ? **MRETOUR** ----------
0= insuffisance de pâturage, 1=manque d'eau, 3=arrivée des pluies, 4= meilleur pâturage au lieu de départ, 5=insécurité, 6= autre (à préciser)

43- Au total quelle est la durée de la grande transhumance ? ---------- **DTRANSH**----------

C- Etat des connaissances sur les perturbations et changements climatiques
44. Avez- vous connu par le passé des périodes de sécheresse ? 0=Oui 1=Non
45. Si Oui, Années ou repères **Manifestations** **Appellation locale**

54. Pouvez-vous conclure que les paramètres du climat suscités ont changé par rapport à ce que vous observiez par le passé ? 0=Oui 1=Non --------**CPARAM** ----------
55. Quelles peuvent être selon vous les causes de ces changements ? --------**CCHG** ----------
0= Désobéissance à une divinité 0=Oui 1=Non
1= Non respect des interdits sociaux 0=Oui 1=Non
2= Déforestation 0=Oui 1=Non
3=Aucune réponse 0=Oui 1=Non
4= Autres (à préciser)……..……..0=Oui 1=Non

D. Risques des perturbations et changements climatiques sur l'élevage/transhumance
56. Risques sur l'élevage/transhumance ---------- **RETRANSH**----------
1= manque de fourrage 0=oui, 1=non
2= allongement de la durée de pâturage journalier 0=oui, 1=non
3= modification des cycles de transhumance 0=oui, 1=non
4= assèchement prolongée des cours d'eau 0=oui, 1=non
5=recrudescence de maladies animales 0=oui, 1=non
6=autres (préciser) ---

57- Durée de pâturage pour la petite transhumance il y a 30 ans **DPTRANSHAV**----------
(Avec précision heure de départ et heure d'arrivée)
58- Durée de pâturage pour la petite transhumance aujourd'hui---- **DPTRANSHAU**----------
59- Début et fin de la grande transhumance il y a 30 ans ---------- **DFGTRANSHAV**----------
60- Début et fin de la grande transhumance aujourd'hui ---------- **DFGTRANSHAU**----------

E. Stratégies développées par les transhumants
61. Stratégies d'adaptation---------- **STRTRANSH**----------
1=production de fourrage et complément de l'alimentation des ruminants
2=complément de l'alimentation du bétail par d'autres moyens
3=semi-intensification de l'élevage
4=modification des périodes de grande transhumance
5=exode
6=augmentation du nombre de bêtes
7=diminution du nombre de bêtes
8= autres (préciser)

--
62. Existence de structure d'encadrement et d'accompagnement pour faire face aux effets négatifs de la variabilité et du changement climatiques
1=oui, 2=non
63. Si oui, lesquelles ?

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Stations météorologiques du bassin versant de la Sota 22
Figure 2 : Fonctionnement du modèle LCM (Aguejdad et Houet, 2008)..... 39
Figure 3 : Localisation du bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri..... 48
Figure 4 : Réseau hydrographique du bassin de la Sota 50
Figure 5 : Formations géologiques du bassin versant de la Sota 53
Figure 6 : Formations pédologiques du bassin de la Sota..... 57
Figure 7 : Circulation générale et mousson ouest africaine..... 60
Figure 8 : Diagramme climatique de Kandi (1965-2010)..... 63
Figure 9 : Diagramme climatique de Parakou (1965-2010) 63
Figure 10 : Variation interannuelle de la température moyenne de 1965 à 2010 65
Figure 11 : Evolution de la population du bassin de la Sota..... 68
Figure 12 : Evolution de la population agricole par Commune en 1992 et 2012 70
Figure 13 : Champ moyen annuel des précipitations..... 73
Figure 14 : Champs de pluie moyens mensuels (1965-2010)..... 77
Figure 15 :Variabilité interannuelle des précipitations annuelles (1965-2010)..... 78
Figure 16 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des précipitations annuelles..... 79
Figure 17 : Tendance des températures maximales et minimales à Kandi 80
Figure 18 : Tendance des températures maximales et minimales à Parakou..... 80
Figure 19 : Anomalies thermométriques de 1965 à 2010 à Kandi 81
Figure 20 : Anomalies thermométriques de 1965 à 2010 à Parakou 81
Figure 21 : Régimes thermométriques moyens de 1965 à 2010 à Kandi 81
Figure 22 : Régimes thermométriques moyens de 1965 à 2010 à Kandi 81
Figure 23 :Variabilité interannuelle des débits de la Sota à l'exutoire de Coubéri (1965-2010) 82
Figure 24 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des débits annuels..... 83
Figure 25 : Evolution mensuelle de l'écoulement sur les sous périodes 1965-1987 et 1988-2010 à Coubéri..... 84
Figure 26 : Bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à Coubéri de 1965 à 2010 84
Figure 27 : Hauteurs de pluie moyenne dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050..... 85
Figure 28 : Moyenne mensuelle des hauteurs de pluie à l'horizon 2050 86
Figure 29 : Ecart de hauteur de pluie (%) dans le bassin versant de Sota à l'horizon 2050 86
Figure 30 : Température moyenne annuelle dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050 87

Figure 31 : Ecart des températures dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050 88
Figure 32 : Ecart des températures dans le Bassin versant de la Sota à l'horizon 2050 88
Figure 33 : Perception sur l'évolution des pluies..... 89
Figure 34 : Perception sur l'évolution thermométrique..... 89
Figure 35: Perception sur l'évolution du vent..... 90
Figure 36 : Perception sur les causes des changements climatiques 90
Figure 37 : Occupation des terres de 1995 dans le BVS..... 94
Figure 38 : Occupation des terres de 2006 dans le BVS..... 95
Figure 39 : Occupation des terres de 2013 dans le BVS..... 96
Figure 40 : Intensité des changements opérés globalement entre catégories et à l'intérieur de chaque classe entre 1995 et 2006..... 102
Figure 41 : Intensité des changements opérés globalement entre catégories et à l'intérieur de chaque classe entre 2006 et 2013..... 103
Figure 42 : Intensités et vitesses des changements par catégorie d'occupation des terres dans le secteur d'étude entre entre 1995 et 2006..... 104
Figure 43 : Intensités et vitesses des changements par catégorie d'occupation des terres dans le secteur d'étude entre entre 2006 et 2013..... 105
Figure 44 : Synthèse de l'évolution de l'occupation du sol de 1995 à 2013 106
Figure 45 : Occupation future des terres dans le bassin versant de la Sota à l'horizon 2050..... 108
Figure 46 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Khaya senegalensis*..... 120
Figure 47 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Khaya senegalensis*..... 121
Figure 48 : Spatialisation des aires favorables à *Khaya senegalensis* dans le bassin de la Sota..... 123
Figure 49 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Afzelia africana*..... 124
Figure 50 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Afzelia africana*..... 125
Figure 51 : Spatialisation des aires favorables à *Afzelia africana* dans le bassin de la sota 127
Figure 52 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Pterocarpus erinaceus* 128
Figure 53 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Pterocarpus erinaceus*..... 129
Figure 54 : Spatialisation des aires favorables à *Pterocarpus erinaceus* dans le bassin de la Sota..... 131
Figure 55 : Présentation des valeurs de AUC relatives à *Daniellia oliveri*..... 132
Figure 56 : Test de Jackknife sur l'importance des variables environnementales individuelles utilisées pour *Daniellia oliveri*..... 133

Figure 57 : Spatialisation des aires favorables à *Daniellia oliveri* dans le bassin de la Sota..... 135
Figure 58 : Pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2013 139
Figure 59 : Pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2050 141
Figure 60 : Synthèse des pressions pastorales dans le bassin de la Sota en 2050 142
Figure 61 : Sensibilité à la pression pastorale dans le bassin de la Sota en 2050..... 143
Figure 62 : Vulnérabilité des parcours naturels à *Afzelia africana* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050..... 145
Figure 63: Vulnérabilité de *Pterocarpus erinaceus* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050 147
Figure 64 : vulnérabilité des parcours naturels à *Khaya senegalensis* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050..... 149
Figure 65 : Vulnérabilité des parcours naturels à *Daniellia oliveri* selon les modèles CSIRO (A), CCCMA (B) et HadCM3 (C) à l'horizon 2050..... 151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques de la station de Coubéri..... 23
Tableau II : Variables environnementales utilisées pour générer les cartes de distribution potentielle des espèces fourragères 25
Tableau III : Effectif des personnes enquêtées par Commune du bassin versant..... 27
Tableau IV : Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des terres 38
Tableau V : Variation mensuelle de l'insolation (en heure) entre 1965 et 2010 dans les stations de Kandi et de Parakou..... 66
Tableau VI : Variation de la vitesse du vent (m/s) sur la période de 1965 à 2010 à Kandi et à Parakou..... 67
Tableau VII : Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 1995 et 2006..... 97
Tableau VIII : Matrice de transition des unités d'occupation des terres entre 2006 et 2013..... 98
Tableau IX : Taux moyen annuel d'expansion spatiale et vitesse d'évolution des unités d'occupation des terres de 1995 à 2006..... 100
Tableau X : Taux d'expansion moyen annuel et vitesse d'évolution (progression ou régression) des unités d'occupation des terres de 2006 à 2013 101
Tableau XI: Superficies des unités d'occupation des terres de 2050..... 108
Tableau XII : Evolution des coefficients de rétention (Cr) dans le BVS..... 109
Tableau XIII : Variation de la superficie des aires favorables à *Khaya senegalensis* 122

Tableau XIV : Variation de la superficie des aires favorables à *Afzelia africana* 126
Tableau XV : Variation de la superficie des aires favorables à *Pterocarpus erinaceus erinaceus* 130
Tableau XVI : Variation de la superficie des aires favorables à *Daniellia oliveri* ... 134

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : Quelques organes de *Khaya senegalensis* 116
Planche 2 : Quelques organes de Afzelia africana 117
Planche 3 : Quelques organes de *Pterocarpus erinaceus* 118
Planche 4 : Quelques organes de *Daniellia oliveri* 119

TABLE DES MATIERES

SIGLES ET ABREVIATIONS 3
DEDICACE 5
REMERCIEMENTS 6
RESUME 8
ABSTRACT 9
INTRODUCTION GENERALE 10
PREMIERE PARTIE : CADRES METHODOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE 20
CHAPITRE 1 : CADRE METHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE 21
1.1 Données de l'étude : nature et sources 21
1.1.1 Données climatologiques observées 21
1.1.2 Données climatologiques simulées 23
1.1.3 Données hydrologiques 23
1.1.4 Données planimétriques 24
1.1.5 Données démographiques et socioéconomiques 24
1.1.6 Données utilisées pour modéliser la distribution des essences fourragères 24
1.1.6.1 Données d'occurrence des espèces fourragères 24
1.1.6.2 Variables environnementales 25
1.2 Collecte des données 25
1.2.1 Recherche documentaire 26
1.2.2 Enquêtes socio-économiques 26
1.2.2.1 Echantillonnage 26
1.2.2.2 Outils et techniques d'enquête 27
1.3 Méthodes de traitement et d'analyse des données 28
1.3.1 Méthode d'analyse de la variabilité hydroclimatique 28
1.3.1.1 Comblement des données hydroclimatiques manquantes 28
1.3.1.2 Interpolation spatiale des précipitations 29
1.3.1.3 Calcul des indices pluviométrique et hydrométrique 31
1.3.1.4 Recherche de tendance et de rupture de stationnarité dans les séries hydroclimatiques 32

1.3.1.5 Calcul des variations moyennes autour des ruptures 35
1.3.1.6 Etude du bilan hydrologique 35
1.3.1.7 Traitement des données socio-économiques 36
1.3.2 Méthode d'analyse de la dynamique de l'occupation des terres 36
1.3.2.1 Analyse statistique des changements d'état des unités d'occupation des terres 36
1.3.2.2 Analyse de l'intensité et de la vitesse des changements 37
1.3.2.3 Analyse de la capacité de rétention en eau des classes d'occupation des terres 38
1.3.2.4 Méthode de projection de l'occupation des terres à l'horizon 2050 39
1.3.3 Méthode d'analyse de l'impact de la dynamique climatique sur la distribution des essences fourragères 42
1.3.3.1 Présentation du modèle Maxent 42
1.3.3.2 Variables environnementales 43
1.3.3.3 Calibrage du modèle Maxent 44
1.3.4 Méthode de spatialisation des niveaux de vulnérabilité des parcours naturels 44
1.3.4.1 Réalisation de la carte de pression pastorale 44
1.3.4.2 Réalisation de la carte de sensibilité aux changements climatiques 46
CHAPITRE 2 : CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE 47
2.1 Situation géographique et justification du choix du bassin de la Sota (BVS) 47
2.2 Caractéristiques biophysiques 49
2.2.1 Réseau hydrographique 49
2.2.2 Contexte hydrogéologique du bassin de la Sota (BVS) 51
2.2.3 Formations pédologiques 54
2.2.4 Relief 58
2.2.5 Formations végétales 58
2.2.6 Contexte climatique du bassin de la Sota (BVS) 59
2.2.6.1 Circulation générale en Afrique de l'Ouest 59
2.2.6.2 Bilan climatique 62
2.2.6.3 Températures 64

2.2.6.4 Insolation 65
2.2.6.5 Vents 66
2.3 Cadre humain 67
2.3.1 Evolution démographique du bassin de la Sota (BVS) 67
2.3.2 Activités socio-économiques dans le bassin versant de la (BVS) 69
2.3.2.1 Agriculture 69
2.3.2.2 Elevage 70
DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUES HYDROCLIMATIQUE ET D'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 72
CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 73
3.1 Variabilité pluviométrique 73
3.1.1 Champ moyen annuel des précipitations 73
3.1.2 Précipitations mensuelles moyennes 74
3.1.3 Variabilité et tendance pluviométrique 78
3.2 Tendance thermométrique dans le bassin versant de la Sota 80
3.3 Variabilité des écoulements dans le bassin versant 80
3.3.1 Variabilité et tendance interannuelle de l'écoulement 82
3.3.2 Evolution mensuelle de l'écoulement entre les sous-périodes 83
3.3.3 Evolution des termes du bilan hydrologique 84
3.4 Scénarios climatiques dans le bassin versant de la Sota 85
3.4.1 Pluviométries mensuelle et annuelle futures 85
3.4.2 Températures mensuelles et annuelles futures 87
3.5 Perception de la variabilité hydroclimatique par les populations 88
3.5.1 Perception sur l'évolution des éléments du climat 88
3.5.1.1 Perceptions sur l'évolution des pluies 88
3.5.1.2 Perceptions sur l'évolution thermométrique 89
3.5.1.3 Perceptions sur l'évolution du vent 90
3.5.2 Perceptions sur les causes des changements climatiques 90
3.6 Discussion 91

CHAPITRE 4 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOTA 93
4.1 Dynamique des changements spatio-temporels de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota (BVS) de 1995 à 2013 93
4.1.1 Etat de l'occupation des terres en 1995 93
4.1.2 Etat de l'occupation des terres en 2006 94
4.1.3 Etat de l'occupation des terres en 2013 95
4.1.4 Evaluation de la dynamique de l'occupation des terres dans le BVS 96
4.1.4.1 Dynamique de l'occupation des terres de 1995 à 2006 96
4.1.4.2 Dynamique de l'occupation des terres de 2006 à 2013 98
4.1.5 Taux moyen annuel d'expansion spatiale et vitesse d'évolution des unités d'occupation des terres dans le BVS 100
4.1.6 Intensités des changements par intervalle de temps, de catégories et transition des unités d'occupation des terres dans le BVS 101
4.1.7 Intensités et vitesses des changements à l'intérieur de chaque catégorie d'occupation des terres 104
4.2 Tendances évolutives de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota et projection à l'horizon 2050 106
4.2.1 Tendances évolutives de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota 106
4.2.2 Projection de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota à l'horizon 2050 107
4.3 Impact de l'anthropisation sur les écoulements de surface dans le BVS 109
4.4 Discussion 110
TROISIEME PARTIE : INCIDENCES DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DES ESSENCES FOURRAGERES ET VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS 114
CHAPITRE 5 : IMPACT DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE SUR LA DISTRIBUTION DE QUATRE ESPECES FOURRAGERES DU BVS 115
5.1 Description botanique des quatre espèces fourragères 115
5.1.1 *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss 115
5.1.2 *Afzelia africana* Smith ex Pers 116

5.1.3 *Pterocarpus erinaceus* Poir 117
5.1.4 *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch 118
5.2 Justification du choix des quatre espèces fourragères 119
5.3 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future des espèces fourragères 119
5.3.1 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Khaya senegalensis* 119
5.3.2 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Afzelia africana* 124
5.3.3 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Pterocarpus erinaceus* 128
5.3.4 Validation du modèle de prédiction des habitats favorables à la présence actuelle et future de *Daniellia oliveri* 132
5.4 Discussion 136
CHAPITRE 6 : EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES PARCOURS NATURELS DU BASSIN VERSANT DE LA SOTA AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 138
6.1 Pression pastorale sur les parcours naturels 138
6.1.1 Pression pastorale en 2013 138
6.1.2 Pression pastorale en 2050 140
6.2 Sensibilité des parcours naturels aux changements climatiques 142
6.3 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques 143
6.3.1 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Afzelia africana* 144
6.3.1.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3 144
6.3.2 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Pterocarpus erinaceus* 146
6.3.2.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3 146
6.3.3 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Khaya senegalensis* 148
6.3.3.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3 148

6.3.4 Niveaux de vulnérabilité des parcours naturels à *Daniellia oliveri* 150
6.3.4.1 Vulnérabilité selon les modèles climatiques CSIRO, CCCMA et HadCM3 150
6.4 Discussion 152
CONCLUSION GENERALE 154
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 159
ANNEXES 175
LISTE DES FIGURES 194
LISTE DES TABLEAUX 196
LISTE DES PLANCHES 197
TABLE DES MATIERES 198